



**Universidade  
de Aveiro**  
2015

Departamento de Engenharia Civil

**José Miguel de  
Mesquita e Silva**

**Metodologia de Avaliação da Vulnerabilidade  
Sísmica de Edifícios em Betão Armado.**





**Universidade  
de Aveiro  
2015**

Departamento de Engenharia Civil

**José Miguel de  
Mesquita e Silva**

**Metodologia de Avaliação da Vulnerabilidade  
Sísmica de Edifícios em Betão Armado.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Romeu da Silva Vicente, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação científica do Doutor Hugo Filipe Pinheiro Rodrigues, Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação científica do Doutor Tiago Miguel dos Santos Ferreira, Investigador do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.





## **o júri**

presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Goncalves Macedo  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Ricardo Joel Teixeira Costa  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra – Faculdade de Ciências e Tecnologia

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente  
Professor Associado da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

A realização desta Dissertação de Mestrado marca o final de uma importante etapa da minha vida que só foi possível graças à colaboração e ao contributo, de forma direta ou indireta, de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de exprimir algumas palavras de agradecimento e profundo reconhecimento, em particular:

Aos meus orientadores, Romeu Vicente, Tiago Miguel Ferreira e Hugo Rodrigues, pela transmissão de conhecimento, pela disponibilidade, pela paciência, pela oportunidade, pela exigência de método e rigor, pela incansáveis orientações científicas e conselhos sempre úteis que permitiram resolver os problemas que foram surgindo.

A todos os meus amigos que me acompanharam e motivaram ao longo deste percurso académico, em particular Eurico Correia, Samuel Carvalho, António Diogo, Hélder Sá, João Freitas, Francisco Roldão, Guilherme Ascensão, Edgar Pinto, Gilberto Selores, Ana Ministro e Catarina Marques Mendes.

A todos os meus amigos e colegas que não destaquei também tenho um agradecimento especial, porque sem eles este percurso não teria sido como foi.

À minha namorada pela paciência e pelo apoio incondicional.

Aos meus pais, pela força, apoio, compreensão e, principalmente, por me terem criado todas as condições para a frequência e conclusão de um curso superior.

A todos, um profundo agradecimento.



**Palavras-chave**

Vulnerabilidade sísmica, Edifícios de betão armado, Índice de vulnerabilidade, Danos, Risco sísmico.

**Resumo**

Sismos recentes, um pouco por todo o mundo, demonstraram que uma grande parte dos edifícios existentes de betão armado apresenta elevada vulnerabilidade sísmica. A avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios de betão armado é um desafio que além de permitir a construção de cenários de dano e perda no caso de um evento sísmico, apoia a definição de estratégias de reabilitação do edificado. Para isso os métodos de avaliação devem estar adaptados à escala de avaliação (edifício, quarteirão e zona urbana).

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia simplificada de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios de betão armado, em que será aplicada a um conjunto de 91 edifícios afetados por sismos recentes, localizados em diferentes países com diferentes intensidades. Pretende-se que esta metodologia sirva como ferramenta base a ser usada numa primeira fase de um processo de avaliação, pela classificação de 8 parâmetros que abordam aspetos internos dos edifícios que pode afetar o seu desempenho e reposta sísmica, contribuindo para indicador dos edifícios potencialmente mais vulneráveis a um cenário sísmico.



**Keywords**

Seismic vulnerability, Reinforced concrete buildings, Vulnerability index, damage seismic risk

**Abstract**

Recent earthquakes, all over the world have demonstrated that a large portion of existing reinforced concrete buildings exhibits high seismic vulnerability. The evaluation of the seismic vulnerability of reinforced concrete buildings is a challenge and allows the construction of damage and loss scenarios in case of a seismic event, supports the setting of the building rehabilitation strategies. For this evaluation methods must be tailored to the rating scale (building block and urban area).

This thesis aims to develop a simplified methodology for assessing the seismic vulnerability of reinforced concrete buildings, which will be applied to a group of 91 buildings affected by recent earthquakes, located in different countries with different intensities. It is intended that this methodology may serve as a base tool to be used in a first phase of an evaluation process, the 8 parameters rating that approach internal aspects of the buildings that can affect the performance and seismic response, contributing to indicator of potentially more buildings vulnerable to seismic scenario.





## ÍNDICES

---



**Índice geral****Índice de figuras.....xvii****Índice de tabelas.....xix****Lista de Símbolos .....xxi****Capítulo 1. Enquadramento, objetivos e organização da dissertação...3**

1.1	Enquadramento do tema.....	3
1.2	Objetivos .....	4
1.3	Organização da dissertação .....	5

**Capítulo 2. Risco e vulnerabilidade sísmica .....9**

2.1	Enquadramento.....	9
2.2	Risco sísmico: conceitos gerais.....	10
2.3	Gestão do risco sísmico .....	12
2.4	Comportamento das estruturas de betão armado perante ação sísmica.....	13
2.5	Danos resultantes de problemas estruturais.....	15
2.5.1	Confinamento Inadequado .....	16
2.5.2	Ductilidade inadequada.....	17
2.5.3	Mecanismo de aderência aço-betão .....	18
2.5.4	Incorreta amarração e sobreposição da armadura principal.....	19
2.5.5	Inadequada capacidade resistente à flexão de vigas e pilares .....	20
2.5.6	Inadequada capacidade resistente dos nós de vigas e pilares.....	21
2.5.7	Mecanismo tipo viga forte pilar fraco.....	22
2.5.8	Influência das paredes de alvenaria na determinação da resposta sísmica dos edifícios.....	23
2.5.9	Irregularidades estruturais em planta ou em altura .....	24
2.6	Comentários finais.....	25

**Capítulo 3. Metodologias da avaliação da vulnerabilidade sísmica ....29**

3.1	Enquadramento.....	29
3.2	Metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica.....	30
3.2.1	Metodologias baseadas na vulnerabilidade observada.....	30
3.2.2	Metodologias de análise baseados em modelos simplificados .....	34
3.2.3	Metodologias de análise detalhada .....	38

3.3	Escolha da metodologia adotada e comparação entre as várias metodologias.....	40
3.4	Comentários finais.....	42

## **Capítulo 4. Avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios em betão armado..... 45**

4.1	Enquadramento.....	45
4.2	Vulnerabilidade sísmica .....	46
4.3	Índice de vulnerabilidade sísmica dos edifícios de betão armado.....	48
4.4	Grau de confiança – Classificação EMBA.....	70
4.5	Classificação de danos de edifícios em betão armado.....	75
4.6	Comentários finais.....	76

## **Capítulo 5. Exposição e discussão dos resultados .....79**

5.1	Enquadramento.....	79
5.2	Classificação dos parâmetros .....	80
5.2.1	Parâmetro P1 – Implantação do Edifício .....	80
5.2.2	Parâmetro P2 – Posição no quarteirão .....	81
5.2.3	Parâmetro P3 – Idade do edifício.....	81
5.2.4	Parâmetro P4 – Irregularidade em planta.....	82
5.2.5	Parâmetro P5 – Irregularidade em altura .....	83
5.2.6	Parâmetro P6 – Existência de mecanismo de <i>soft-storey</i> .....	84
5.2.7	Parâmetro P7 – Presença de pilares curtos.....	84
5.2.8	Parâmetro P8 – Outros elementos.....	85
5.2.9	Índices de vulnerabilidade .....	86
5.2.10	Resultados das classificações .....	87
5.3	Grau de confiança.....	88
5.4	Estimativa de dano .....	91
5.4.1	Grau de dano dos edifícios analisados .....	91
5.4.2	Formulação da expressão de dano para edifícios de betão armado .....	92
5.5	Comentários finais.....	98

## **Capítulo 6. Conclusões e propostas de trabalho futuro.....101**

6.1	Principais conclusões .....	101
6.2	Perspectivas de trabalho futuro .....	103

## **Bibliografia..... 107**

## Índice de figuras

Figura 2-1 - Fatores de que depende o risco sísmico. Fonte: (Santos & Vicente, 2013).....	10
Figura 2-2 – Pilares de betão armado com inadequada armadura de esforço transverso. Fonte: Sismo em Bolonha, Itália (2012) e sismo no Peru (2007).....	16
Figura 2-3 – Vigas com comportamento não dúctil. Fonte: Varum et al,2005 .....	17
Figura 2-4 – Pilares com fraca aderência aço-betão. Fonte: Sismo na Nova Zelândia (2011).....	18
Figura 2-5 – Pormenorização deficiente das armaduras. Fonte: Sismo em Nova Zelândia (2011) e sismo Sichuan, China (2008).....	19
Figura 2-6 – Capacidade de deformação em pilares. Fonte: Sismo em Sichuan, China (2008).....	20
Figura 2-7 – Resistência inadequada dos nós viga-pilar. Fonte: Sismo em Sichuan, China (2008).....	21
Figura 2-8 – Mecanismo do tipo viga-forte pilar-fraco. Fonte: Sismo em Izmit, Turquia (1999).....	22
Figura 2-9 – Mecanismo tipo <i>short-column</i> devido à abertura de janelas. Fonte: Sismo em L'Aquila, Itália (2009) e sismo na Nova Zelândia (2011).....	23
Figura 2-10 – Mecanismo tipo soft-storey. Fonte: Sismo em L'Aquila, Itália (2009) e sismo em Izmit, Turquia (2011).....	24
Figura 3-1 – Definição das classes de vulnerabilidade segundo o EMS-98 [adaptado de Grünthal, 1998]. Fonte : (Vicente, 2008).....	33
Figura 4-1 - Desmoronamento da encosta com projeção de pedras sobre a localidade (Sismo L'Aquila, Italia, 2009) Fonte: (Bhatt, 2007) .....	50
Figura 4-2 – Plataforma de aterro e escavação. Fonte: (Bhatt, 2007).....	51
Figura 4-3 - Posição dos edificios no agregado (BE - Banda Extremo, BM - Banda Meio, E - Enclausurado, G - Gaveto, I - Isolado). Fonte: (Vicente, 2008).....	52
Figura 4-4 - Interação entre edificios adjacentes com a respetiva classe de vulnerabilidade. Fonte: Ferreira (2015).....	53
Figura 4-5 - Explicação dos limites do desnível dos pisos dos edificios adjacentes. Fonte: Yakut et al.(2012) .....	54
Figura 4-6 - Exemplos de má execução na conceção do edifício .....	58

Figura 4-7 - Edifício parcialmente devoluto .....	59
Figura 4-8 – Supressão de elementos resistentes .....	62
Figura 4-9 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo a) e b). Fonte: (CEN, 2004) .....	62
Figura 4-10 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo c). Fonte: (CEN, 2004) .....	63
Figura 4-11 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo d). Fonte:(CEN, 2004) .....	64
Figura 4-12 - Alturas diferentes entre o piso do r/chão e os pisos e vazamento do piso térreo devido ao comércio.....	66
Figura 4-13 – Presença de <i>soft-storey</i> .....	67
Figura 4-14 - Pilares curtos na base do edifício (Lorca, Espanha) .....	68
Figura 5-1 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P1 .....	80
Figura 5-2 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P2 .....	81
Figura 5-3 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P3 .....	82
Figura 5-4 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P4 .....	83
Figura 5-5 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P5 .....	83
Figura 5-6 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P6 .....	84
Figura 5-7 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P7 .....	85
Figura 5-8 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P8 .....	85
Figura 5-9 - Distribuição dos edifícios analisados pelos intervalos de valores dos índices de vulnerabilidade.....	86
Figura 5-10 - Influência de cada parâmetro no cálculo do $I_v$ .....	87
Figura 5-11 – Distribuição dos parâmetros pelo grau de confiança médio .....	89
Figura 5-12 – Distribuição dos edifícios pelo grau de confiança médio associado à respetiva classificação.....	90
Figura 5-13 – Relação entre o grau de confiança e o índice de vulnerabilidade atribuído a cada edifício analisado .....	90
Figura 5-14 - Histograma de distribuição de dano para Intensidades VII, VIII e IX .....	91
Figura 5-15 - Curva de melhor ajuste aos valores médios de dano avaliados aos edifícios .....	96
Figura 5-16 – Curvas de vulnerabilidade para os edifícios de betão armado .....	97

## Índice de tabelas

Tabela 3-1 - Formato da matriz de probabilidade de dano (Whitman, Reed, & Hong, 1974)	31
Tabela 3-2 - Definição das classes de vulnerabilidade das construções segundo a escala MSK (Medvedev & Sponheuer, 1969)	31
Tabela 3-3 – Classificação do dano dos edifícios (Medvedev & Sponheuer, 1969)	32
Tabela 3-4 – Definição de quantidade de dano que os edifícios estão sujeitos à ação sísmica (Medvedev & Sponheuer, 1969)	32
Tabela 3-5 –Relação entre o tipo de estruturas com a escala de intensidade para obter uma possível classificação do dano dos edifícios segundo (Medvedev & Sponheuer, 1969)	32
Tabela 3-6 - Metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica aplicadas a diferentes escalas (T. Ferreira, 2009)	40
Tabela 3-7 – Confronto entre os parâmetros estruturais de cada metodologia de avaliação sísmica analisada.	41
Tabela 4-1 - Índice de vulnerabilidade ( $I_v$ ), parâmetros que o definem e respectivos pesos associados	48
Tabela 4-2 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P1	51
Tabela 4-3 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P2	54
Tabela 4-4 - Os vários Eurocódigos Estruturais	57
Tabela 4-5 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P3	57
Tabela 4-6 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P4	61
Tabela 4-7 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo a) e b)	64
Tabela 4-8 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo c)	65
Tabela 4-9 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo d)	65
Tabela 4-10 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P6	67
Tabela 4-11 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P7	69
Tabela 4-12 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P8	69
Tabela 4-13 - Grau de confiança da classificação da vulnerabilidade sísmica	70
Tabela 4-14 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P1	71

Tabela 4-15 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P2 .....	71
Tabela 4-16 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P3 .....	72
Tabela 4-17 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P4 .....	72
Tabela 4-18 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P5 .....	73
Tabela 4-19 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P6 .....	73
Tabela 4-20 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P7 .....	74
Tabela 4-21 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P8 .....	74
Tabela-4-22 - Classificação de danos de edifícios em betão armado. Fonte: (Grünthal, 1998) .....	75
Tabela 5-1 - Valor médio dos índices de vulnerabilidade obtidos.....	86
Tabela 5-2 - Graus de confiança e respetivos intervalos de quantificação .....	88
Tabela 5-3 - Índices de vulnerabilidade para cada tipologias de betão armado. Fonte: Giovinazzi (2005) .....	92
Tabela 5-4 - Atribuição da classe de vulnerabilidade às diferentes tipologias construtivas. Fonte: Giovinazzi (2005) .....	93
Tabela 5-5 – Diferença percentual entre o $\mu_D$ médio observado e o $\mu_D$ médio pela expressão.....	96



## Lista de Símbolos

ATC	Applied Technology Council
CEN	Comité Europeu de Normalização
$C_{vi}$	Classe de Vulnerabilidade
EC8	Eurocódigo 8
EMS-98	Escala Macrossísmica Europeia
FEMA	Federal Management Agency
GNDT	Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti
$I_v$	Índice de Vulnerabilidade
$I_{v,médio}$	Índice de Vulnerabilidade médio
$L_{max}$	Maior dimensão em planta do edifício
$L_{min}$	Menor dimensão em planta do edifício
MPD	Matriz de probabilidade de dano
MSK	Seismic Intensity Scale
$p_i$	Peso de cada parâmetro
Q	Ductilidade Estrutural
REBA	Regulamento de estruturas de betão
REBAP	Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado
RGEU	Regulamento geral das edificações urbanas
RSA	Regulamento de segurança e ações para estruturas de edifícios e pontes
SIG	Sistema de Informação Geográfica
$V$	Índice de Vulnerabilidade
$V_{Imax}$	Maior valor de intervalo que cada tipologia construtiva pode assumir
$V_{Imin}$	Menor valor de intervalo que cada tipologia construtiva pode assumir
$\mu_D$	Grau de dano médio



## **CAPÍTULO 1**

---

### **ENQUADRAMENTO, OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**



## **Capítulo 1. Enquadramento, objetivos e organização da dissertação**

### **1.1 Enquadramento do tema**

É indiscutível que em zonas de maior atividade sísmica, as perdas humanas e económicas devem-se, em grande parte, aos danos severos nas construções e ao colapso de edifícios devido a um comportamento sísmico inadequado motivada, não apenas por falta de legislação específica que contemplasse a ação sísmica à data em que o edifício foi construído, mas também pelo incumprimento das boas práticas construtivas e à deficiente qualidade dos materiais de construção. Deste modo, é necessário que todas as ferramentas e recursos devam ser dispostos, numa tentativa de mitigar os efeitos dos sismos contribuindo para uma melhor perceção e desenvolvimento da avaliação do risco sísmico. Conceptualmente, o risco sísmico é função de três componentes probabilísticas: a perigosidade sísmica, a exposição e a vulnerabilidade. No caso das estruturas de engenharia civil, esta última componente assume particular importância, na medida em que uma eventual intervenção ao nível do reforço estrutural tem influência direta na sua vulnerabilidade intrínseca e, consequentemente, no seu risco sísmico associado.

Para a avaliação da vulnerabilidade estrutural é fundamental o uso de metodologias adequadas a cada situação, isto é, a natureza qualitativa ou quantitativa da abordagem a adotar em cada situação condiciona a formulação destas metodologias e respetivo nível de detalhe da inspeção e levantamento a ser realizado. As metodologias empíricas, baseiam-se na observação de danos pós-sismo associados a diferentes tipologias estruturais e intensidades sísmicas, e as metodologias analíticas, implicam por sua vez a modelação e computação da resposta de uma estrutura representativa de uma dada tipologia face a uma determinada intensidade da ação sísmica. Existe ainda uma diferente abordagem, as metodologias heurísticas, onde a vulnerabilidade dos edifícios é atribuída com base no conhecimento e experiência de especialistas (Vicente et al., 2014). Embora ao longo dos últimos anos a investigação aplicada à mitigação do risco sísmico tenha vindo a ganhar uma maior importância, ainda há muito trabalho a desenvolver e por isso, um pouco por todo o mundo, profissionais de várias áreas, nomeadamente da engenharia e da proteção

civil, continuam a encetar esforços organizados no sentido de melhorar e estandardizar o conhecimento técnico-científico no âmbito da avaliação e da mitigação do risco sísmico (T. Ferreira, 2009).

## **1.2 Objetivos**

O principal objetivo desta dissertação, passa pela elaboração de uma proposta para uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica em edifícios de betão armado, podendo depois ser aplicada a um grupo distinto de edifícios. Numa primeira fase, procedeu-se à discussão e seleção dos diversos parâmetros de avaliação da vulnerabilidade, bem como à atribuição dos seus respetivos pesos e classes de vulnerabilidade. A segunda fase consiste na atribuição de um grau de dano médio a cada um desses 91 edifícios, avaliado de acordo com a Escala Macrossísmica Europeia (Grünthal, 1998). Na terceira fase, uma série de observadores procedeu à atribuição do grau de dano de cada edifício, tendo sido obtendo desta forma o grau de dano médio para cada edifício. A quarta fase consiste na aplicação e calibração de curvas de vulnerabilidade, as quais são ainda utilizadas para a obtenção de uma nova função de dano calibrada para edifícios de betão armado a partir do programa *Matlab®*.

Para o cumprimento dos objetivos acima enunciados, foram realizadas as seguintes tarefas:

- Estado de arte sobre as diferentes metodologias existentes para a avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios;
- Seleção do tipo de metodologia a desenvolver;
- A escolha dos parâmetros mais importantes para a elaboração da metodologia;
- A atribuição inicial dos pesos para cada parâmetro escolhido;
- Seleção dos edifícios a utilizar para a calibração dos pesos atribuídos;
- Aplicação da metodologia e obtenção do índice de vulnerabilidade;
- Aplicação e calibração de curvas de vulnerabilidade.

### **1.3 Organização da dissertação**

A presente dissertação está organizada em 6 capítulos, dando-se um ênfase particular ao quarto e quinto capítulo, que se consideram como os mais relevantes da presente dissertação. No capítulo 1 faz-se um enquadramento do tema, apresenta-se os objetivos da dissertação e a forma como esta está organizada.

No capítulo 2 são apresentados os principais conceitos abordados nesta dissertação, mais precisamente aos conceitos de vulnerabilidade e risco sísmico. Este capítulo aborda ainda o comportamento das estruturas de betão armado, salientando os danos típicos observados neste tipo de estruturas aquando da ocorrência de sismos e os processos para a gestão de risco.

No capítulo 3 são apresentadas e classificadas as metodologias existentes para a avaliação da vulnerabilidade e avaliação do risco, sendo ainda feito o confronto, em termos de potencialidades e limitações, entre as diferentes metodologias que servem de base à metodologia apresentada no capítulo 4.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios de betão armado proposta nesta dissertação, fazendo referência a todos os aspetos e parâmetros que esta metodologia considera para a avaliação da vulnerabilidade. Será também apresentado o grau de confiança para cada parâmetro a partir de uma classificação EMBA (E – elevado; M – médio; B – baixo; A – ausente) como também a classificação de dano em edifício de betão armado concebida por Grünthal (1998).

No capítulo 5 é aplicada a metodologia proposta nesta dissertação e a análise dos resultados da sua aplicação a diversos edifícios de betão armado. Como resultados apresenta-se o índice de vulnerabilidade, a análise dos graus de dano e o grau de confiança de cada edifício, com intuito no fim destas análises desenvolver uma expressão de dano para os edifícios de betão armado.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões mais relevantes do trabalho desenvolvido e, no seguimento deste, alguns aspetos que poderão ser alvo de desenvolvimento futuro.





## **CAPÍTULO 2**

---

### **RISCO E VULNERABILIDADE SÍSMICA**



## **Capítulo 2. Risco e vulnerabilidade sísmica**

### **2.1 Enquadramento**

O impacto dos sismos em áreas urbanas é um problema complexo que se tem vindo a agravar nas ultimas décadas devido a diversos fatores tais como a concentração populacional, densidade de construção e as atividades económicas como a indústria, comercio e turismo. A dimensão e a gravidade dos efeitos de um sismo numa determinada sociedade dependem da extensão e do grau de danificação provocada pelo sismo aos elementos expostos. Nesse sentido, mesmo que um local esteja sujeito a sismos intensos, se for escassamente habitado, o risco sísmico é menor. Assim, e apesar dos sismos serem um fenómeno natural inevitável e incontrolável, os seus efeitos não o são (Azevedo, 2008). Como introdução à dissertação, este capítulo pretende abordar, de uma forma resumida, os conceitos base sobre o risco e vulnerabilidade sísmica em edifícios de betão armado. Também analisados os danos tipo mais frequentes deste tipo de construção, causados pela ação sísmica e a importância de uma gestão de risco à uma escala urbana.

## 2.2 Risco sísmico: conceitos gerais

O risco sísmico pode ser definido como a possibilidade ou probabilidade de perdas, como nível de destruição ou dano, em consequência da ocorrência de um determinado evento sísmico (Vicente, Parodi, Lagomarsino, Varum, & Silva, 2011). A avaliação do risco sísmico envolve a consideração de três fatores: a vulnerabilidade estrutural, a perigosidade sísmica e a exposição (ver Figura 2-1).

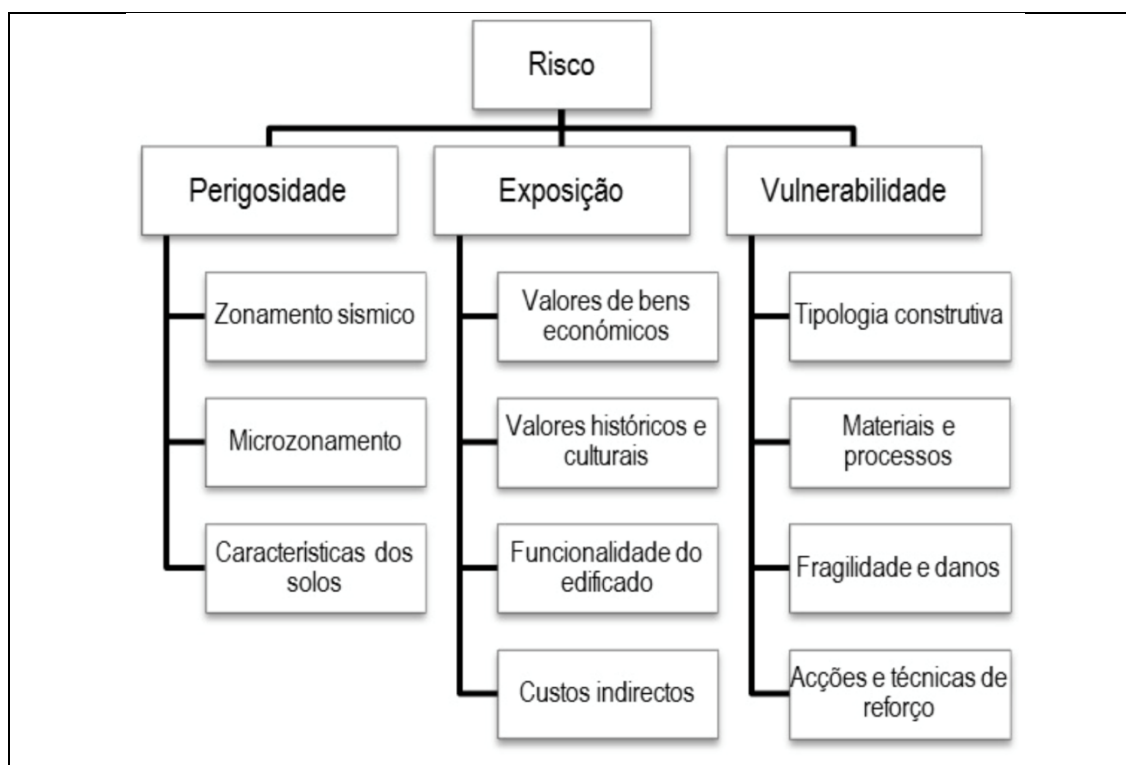


Figura 2-1 - Fatores de que depende o risco sísmico. Fonte: (Santos & Vicente, 2013)

Essa conjugação pode ser transcrita pela Equação (1.1):

$$Risco\ Sísmico = Perigosidade \times Vulnerabilidade \times Exposição \quad (1.1)$$

A perigosidade sísmica é definida como a probabilidade de ocorrência de um evento sísmico, com uma determinada intensidade, associado a um período de retorno, num determinado local ou zona. Esta relaciona-se com o zonamento sísmico, com o tipo de solo e, conseqüentemente, com a ação sísmica a que o edifício pode estar sujeito (Giovinazzi, 2005).

A exposição corresponde ao valor dos elementos em risco, proveniente dos custos diretos dos elementos estruturais e não estruturais, bem como dos custos indiretos associados à interrupção de serviços, comunicações e ainda custos sociais e de tempo. A exposição abrange os custos sociais, culturais, simbólicos e económicos associados a um eventual acontecimento (Vicente, 2008).

A vulnerabilidade estrutural é uma propriedade intrínseca da estrutura, uma característica do seu comportamento face a uma ação sísmica, descrita através de uma relação de causa-efeito, em que o sismo é a causa, e o efeito é o dano sofrido (Vicente et al., 2011). São de salientar alguns aspetos em relação à construção nova e construção existente. Na construção nova, com o respeito das normas e códigos antissísmicos, no projeto e execução, a sua vulnerabilidade estaria, em princípio, apenas condicionada a eventuais deficiências nos mecanismos de fiscalização de todo o processo construtivo. Em relação às construções antigas, isto é, edifícios concessionados e construídos antes da entrada em vigor de qualquer regulamentação sísmica, a sua vulnerabilidade sísmica será, à priori, elevada, devido à ausência de dimensionamento sísmico específico.

Na atualidade, a maior parte da população vive em centros urbanos localizados nas grandes cidades devido à economia por ela gerada, contribuindo para o aumento do risco sísmico da região. É assim compreensível que uma dada região possa ter um risco sísmico reduzido ou elevado se esta contiver elementos, como bens construídos, atividades económicas ou população, expostos ao risco. Não sendo possível antecipar muitas das ocorrências com origem em fenómenos naturais, o esforço terá de ser concentrado na redução dos impactos através de uma gestão de risco, nomeadamente a mitigação do risco e a preparação para lidar com as consequências.

## **2.3 Gestão do risco sísmico**

A complexidade dos processos de rotura na origem dos sismos, não permite à ciência produzir previsões de sismos num prazo razoável que satisfaça as necessidades, tais como: saber o tempo, localização e dimensão do próximo evento (Oliveira, Roca, & Goula, 2005). A gestão de risco é um processo que engloba uma série de ações que apoiam a implementação de medidas que reduzam o potencial de perda, na ocorrência de um evento sísmico. Um dos mais vulgares produtos finais na implementação de um programa de gestão de risco é a definição de um plano de emergência (Vicente, 2008). Porém, a avaliação do risco sísmico é apenas uma das tarefas, da teia complexa da gestão de risco de um sistema urbano. Como instrumentos de gestão de emergência, são considerados: a preparação, a mitigação, a resposta e a recuperação.

Na fase de preparação, desenvolvem-se ações e medidas de planeamento ao nível de gestão de emergência, como por exemplo exercícios de simulação e o desenvolvimento de sistemas de alerta e de evacuação (Quarantelli, 1988). A mitigação, é a fase de implementação de medidas e ações antes da ocorrência do evento, de modo a reduzir a dimensão do desastre (Quarantelli, 1997). A par da importância da fase de mitigação e redução do risco de desastres naturais, também a fase posterior à ocorrência de um sismo é importante.

O que acontece após a ocorrência de um sismo é uma consideração que devemos ter sempre em mente. As entidades competentes devem ter sempre um plano de resposta em caso de emergência. A fase de resposta inicia-se durante, e no período imediato, à ocorrência do desastre, sendo uma fase claramente associada ao domínio da gestão de emergência (Haddow, Bullock, & Coppola, 2002). As medidas iniciais prendem-se com a emissão de alertas e de evacuação das populações, sendo que na fase posterior, se iniciam as operações de busca e de salvamento dos feridos e a garantia da ordem nas áreas de desastre. Já a fase de recuperação, compreende as tarefas associadas à reparação e restauro do ambiente construído, designadamente habitações e infra estruturas básicas (Vicente, 2008).

## 2.4 Comportamento das estruturas de betão armado perante ação sísmica

Os estudos realizados sobre este tema, tem comprovado que as estruturas com planta simétrica e regular em altura, apresentam um melhor comportamento sísmico do que estruturas com irregularidades nos alçados e irregularidades em planta. Isto deve-se a um desequilíbrio entre o centro de rigidez e o centro de massa da estrutura, o que vai levar a que os efeitos de torção possam a induzir colapsos locais. Uma configuração em planta complexa e irregular corresponde normalmente a estruturas de piso com baixa rigidez no plano (Coelho, 2010). O desempenho sísmico dos edifícios de betão armado pode ainda ser influenciado por diversos outros fatores, tais como:

- Ausência de dimensionamento sísmico específico ou conceção e dimensionamento inadequados;
- Baixa ductilidade dos elementos de betão armado, por insuficiência ou ausência de confinamento dos varões da armadura longitudinal, em especial nos nós viga-pilar;
- Concentração de exigências em zonas localizadas, devido a irregularidades;
- Existência de pisos vazados sem paredes resistentes;
- Interação da estrutura com paredes não-estruturais que pode induzir esforços de torção e concentrações de tensões não previstos;
- Elevada flexibilidade de alguns edifícios, sem consideração das distâncias adequadas entre edifícios;
- Ausência de conservação adequada das estruturas, em particular associada à existência de danos anteriores não reparados.

Para tal não acontecer, o Eurocódigo 8 tem indicações sobre aspetos de conceção das estruturas, de forma assegurar uma capacidade resistente suficiente, e a exigência de comportamento para o edifício (Coelho, 2010). A escolha da exigência de comportamento para uma dada estrutura existente, depende do nível de segurança sísmica que se pretende atribuir-lhe. Este terá que ser definido, a montante da aplicação do regulamento, pelas entidades competentes, como as autoridades nacionais e/ou locais, através da implementação de programas de mitigação de risco sísmico.

As exigências fundamentais de desempenho do comportamento estão relacionadas com o nível de danos requeridos para uma estrutura, quando sujeita à ação de um sismo. O nível

de dano é representado por um Estado Limite (*LS – Limit State*) e a ação sísmica de dimensionamento associada, é definida através de uma probabilidade de ocorrência (ou, de forma equivalente, a um período de retorno) (Marques, 2012).

No caso de estruturas existentes, o Eurocódigo 8 (CEN, 2004) apresenta três exigências fundamentais de desempenho associadas aos seguintes Estados Limite:

- Estado de Colapso Eminente (*NC – Near Collapse*) – Embora mantenha a capacidade de suportar cargas verticais, a estrutura apresenta-se fortemente danificada, com resistência e rigidez residuais fracas. A maioria dos elementos não estruturais sofreu colapso. Observam-se deslocamentos relativos permanentes elevados;
- Estado de Danos Significativos (*SD – Significant Damage*) – A estrutura exhibe danos significativos, com alguma resistência e rigidez residual, suportando ainda cargas verticais. Os elementos não estruturais encontram-se danificados, não se verificando, no entanto, colapsos para fora do plano de paredes divisórias e/ou de enchimento. Observam-se deslocamentos relativos permanentes moderados. É provável que a reparação da estrutura não seja economicamente viável;
- Estado de Limitação de Danos (*DL – Damage Limitation*) – A estrutura encontra-se ligeiramente danificada, mantendo as suas características de resistência e rigidez. Os elementos não estruturais poderão apresentar fendilhação, cuja reparação é fácil e económica. Não se observam deslocamentos relativos permanentes.



## 2.5 Danos resultantes de problemas estruturais

Sismos recentes têm demonstrado que, para garantir o bom desempenho de uma construção face a um sismo, é necessário garantir a qualidade do projeto e da construção. Apesar da existência de regulamentação sísmica atualizada, esta poderá não ser suficiente para garantir a segurança. A identificação das falhas estruturais é assim essencial para definir estratégias de reforço no sentido de aumentar a resistência sísmica dos edifícios. As causas mais frequentes de dano severo e/ou colapso de edifícios de betão armado quando sujeitos à ação sísmica surgem associadas aos seguintes efeitos/mecanismos (H. Varum, Costa, & Pinto, 2005):

- Confinamento inadequado;
- Ductilidade inadequada;
- Mecanismos de aderência aço-betão;
- Incorreta amarração e sobreposição da armadura principal;
- Inadequada capacidade resistente à flexão de vigas e pilares;
- Inadequada capacidade resistente dos nós viga-pilar;
- Mecanismo tipo viga forte-pilar fraco;
- Não consideração da influência das paredes de alvenaria na determinação da resposta sísmica dos edifícios;
- Irregularidades estruturais em planta ou em altura.

Ao longo das subsecções seguintes vai ser resumido cada causa de dano referida em cima com figuras para melhor ilustração da situação.

### **2.5.1 Confinamento Inadequado**

Durante um sismo o colapso dos pilares, vigas e dos nós vigas-pilar encontra-se geralmente relacionado com a falta/deficiente pormenorização de armadura transversal. O confinamento deverá ser mais efetivo em zonas onde é previsível a formação de rótulas plásticas para que sejam evitados a formação de um mecanismo de colapso. Confinando esta zona de betão com estribos, a ductilidade é melhorada, melhorando assim a resposta dos elementos e a resposta global dos edifícios (Figura 2-2). Isto é garantido pelos diâmetros dos estribos, do seu afastamento, da armadura longitudinal, da qualidade do aço, da forma das seções e da forma dos estribos (H. Varum et al., 2005).



**Figura 2-2 – Pilares de betão armado com inadequada armadura de esforço transversal. Fonte: Sismo em Bolonha, Itália (2012) e sismo no Peru (2007).**

### 2.5.2 Ductilidade inadequada

A ductilidade pode ser definida como a capacidade que um dado material, elemento estrutural ou estrutura, possui para suportar exigências de deformação em regime inelástico, sem rotura ou colapso. Os materiais que suportam pouca ou nenhuma deformação no processo de ensaio de tração são considerados materiais frágeis. Esta propriedade tem implicações diretas na capacidade de dissipação de energia de uma estrutura, sendo fundamental para evitar, ou diminuir, a probabilidade de colapso face à ocorrência de um sismo de determinada intensidade. Como este conceito não foi corretamente tratado nos primeiros regulamentos de cálculo sísmico, existe um número elevado de edifícios de betão armado que não estão concebidos para uma ductilidade adequada, exibindo um comportamento não-dúctil (Figura 2-3), contribuindo para o elevado risco sísmico das nossas cidades (H. Varum et al., 2005).



Figura 2-3 – Vigas com comportamento não dúctil. Fonte: Varum et al,2005

### **2.5.3 Mecanismo de aderência aço-betão**

O desempenho das estruturas de betão armado depende em muito do comportamento do mecanismo de transferência de tensões entre o aço e o betão. A má pormenorização da amarração dos vários elementos estruturais poderá causar a rotura ou mesmo o colapso durante a ocorrência de um sismo. A aderência aço-betão é assegurada por atrito entre ambos, mas sobretudo pelo imbricamento entre o betão e a armadura que garante a necessária transferência de tensões do betão para a superfície das armaduras. No caso de edifícios existentes, este mecanismo de transferência de tensões é ainda mais frágil devido á ausência de conhecimentos de engenharia sísmica, usando-se armaduras lisas e betão de baixa resistência e compacidade (Fernandes, Varum, & Costa, 2007). Caso não seja suficiente para assegurar uma correta aderência aço-betão, a peça de betão armado poderá simplesmente deslocar-se da zona onde estava implantada (Figura 2-4). De forma a garantir uma melhor amarração, dever-se-á usar um maior número de varões e com menor diâmetro pois quando são usados varões de grande diâmetro é difícil assegurar o comprimento de amarração requerido (H. Varum et al., 2005).



**Figura 2-4 – Pilares com fraca aderência aço-betão. Fonte: Sismo na Nova Zelândia (2011).**

#### 2.5.4 Incorreta amarração e sobreposição da armadura principal

Segundo Varum et al., (2005), a incorreta pormenorização em projeto, ou a má execução em obra das zonas de amarração e de sobreposição da armadura longitudinal, constituem uma deficiência frequente nas estruturas existentes de betão armado (Figura 2-5). Neste contexto, apresentam-se algumas regras básicas para a sua boa realização:

- Evitar a sobreposição e amarração em locais onde o betão tende a fissurar de modo extensivo (por exemplo, em locais de formação de rótulas plásticas, ou em zonas de transição de betonagem);
- Dar especial atenção ao confinamento em locais com amarrações embebidas e sobrepostas (nós), de forma a impedir o arranque das armaduras;
- Sempre que possível, executar a sobreposição na direção perpendicular aos esforços principais de compressão;
- Para garantir uma melhor amarração deve-se optar por usar um maior número de varões e com menor diâmetro. Quando são usados varões de grande diâmetro, é muito difícil assegurar o comprimento de amarração requerido, uma vez que a força nos varões aumenta proporcionalmente ao quadrado do diâmetro, e a força de aderência é linearmente dependente do diâmetro dos varões.



Figura 2-5 – Pormenorização deficiente das armaduras. Fonte: Sismo em Nova Zelândia (2011) e sismo Sichuan, China (2008).



### **2.5.5 Inadequada capacidade resistente à flexão de vigas e pilares**

O tipo de aço adotado, a sua quantidade, e os detalhes de pormenorização, têm um papel fundamental na resposta sísmica das estruturas de betão armado (Bertero, 1982). Segundo Varum et al., (2005), o bom comportamento pode ser conseguido:

- Limitando o esforço axial de compressão, ou aumentando a área da secção transversal;
- Limitando a quantidade de armadura longitudinal. Quanto maior for a área da armadura longitudinal e a tensão de cedência do aço, maiores serão as exigências de compressão no betão;
- A capacidade em flexão pode ser melhorada com um betão de melhor qualidade, com a adoção de armadura de compressão e, fundamentalmente, com um confinamento adequado (Figura 2-6).



**Figura 2-6 – Capacidade de deformação em pilares. Fonte: Sismo em Sichuan, China (2008).**

### 2.5.6 Inadequada capacidade resistente dos nós de vigas e pilares

Para o bom desempenho das estruturas de betão armado, é necessário também garantir que as vigas e pilares estejam bem ligados entre si. As deficiências associadas aos nós viga-pilar são comuns durante a ocorrência dos sismos, conduzindo a danos severos, ou mesmo o colapso do edifício (Figura 2-7). Os nós viga-pilar podem sofrer uma perda significativa de rigidez, devido à insuficiente resistência ao corte e à inadequada ancoragem da armadura longitudinal das vigas e pilares que concorrem no próprio nó (Varum et al., 2005). Os mecanismos mais frequentes de rotura dos nós viga-pilar, estão relacionados com:

- A ausência ou inadequada adoção de armadura de confinamento nos nós;
- A inadequada ancoragem da armadura longitudinal dos elementos estruturais nos nós.



Figura 2-7 – Resistência inadequada dos nós viga-pilar. Fonte: Sismo em Sichuan, China (2008).

### **2.5.7 Mecanismo tipo viga forte pilar fraco**

Durante um sismo, os nós de ligação entre viga e pilar são sujeitos a esforços elevados e, de forma a se obter um comportamento dúctil dos pórticos, as exigências de deformações em regime não-linear devem ser mantidas ao nível das vigas. Em qualquer nó, os pilares devem apresentar uma resistência superior à das vigas, isto porque, se for o inverso, as vigas fortes vão provocar deformações inelásticas sobre os pilares fracos, levando a uma perda de resistência da estrutura e, eventualmente, ao colapso (Figura 2-8) (Pinto, 1998).

De forma a potencializar a capacidade de dissipação de energia, é necessário que se forme o maior número de rótulas plásticas, sem que ocorra a formação de um mecanismo. Os pórticos, que, em geral, correspondem a estruturas com elevado grau de redundância, permitem explorar o comportamento não-linear e a formação de um considerável número de rótulas plásticas. No entanto, para que tal aconteça, as rótulas plásticas devem-se planear nas extremidades das vigas e não nos pilares. Para que as rótulas plásticas se formem nas vigas, a soma dos momentos resistentes deverá ser superior à soma dos máximos momentos que se podem desenvolver na viga em regime não linear. Apesar disso, muitas das estruturas existentes não foram concebidas com esse princípio devido à inexistência de regulamentos na época da sua construção (Marques, D.F.F, 2012).



**Figura 2-8 – Mecanismo do tipo viga-forte pilar-fraco. Fonte: Sismo em Izmit, Turquia (1999)**



### 2.5.8 Influência das paredes de alvenaria na determinação da resposta sísmica dos edifícios

Usualmente, as paredes de alvenaria não são consideradas no dimensionamento das estruturas de betão armado. Apesar de serem um elemento relativamente frágil, as paredes de alvenaria de enchimento podem modificar significativamente o comportamento das estruturas de betão armado quando sujeitas a ações horizontais, alterando a rigidez, a resistência máxima e a capacidade de dissipação de energia (Varum, Rodrigues, Vicente, & Costa, 2011). A não consideração da influência destes elementos no dimensionamento de estruturas novas influencia de forma significativa a resistência e rigidez lateral dos edifícios, atraindo forças para elementos que não foram dimensionados para tal. (Paulay & Priestley, 1992). Observa-se, com frequência, a interrupção do preenchimento das paredes de alvenaria, próximo de elementos verticais resistentes, para abertura de janelas ou para outros fins. Como consequência da restrição lateral imposta pela inclusão parcial da alvenaria, há uma diminuição da altura útil disponível para os pilares absorverem a diferença de deslocamentos horizontais entre pisos, formando o mecanismo tipo *short-column* (Figura 2-9). Quando sujeitos a uma ação sísmica, estes troços de pilar ficam submetidos a esforços superiores àqueles que se desenvolveriam na ausência de alvenaria com possibilidade de desenvolverem um comportamento frágil, com rotura por esforço transversal (Lopes, 2008).



Figura 2-9 – Mecanismo tipo *short-column* devido à abertura de janelas. Fonte: Sismo em L'Aquila, Itália (2009) e sismo na Nova Zelândia (2011).

### 2.5.9 Irregularidades estruturais em planta ou em altura

A correta conceção de uma estrutura é essencial para um adequado desempenho face as forças de inércia horizontais que se podem desenvolver em qualquer direção no plano. Edifícios simples, regulares e com sistemas resistentes para as forças horizontais, tendem a exibir bom comportamento. As variações bruscas de rigidez, resistência ou massa da estrutura, e/ou propriedades dos elementos de um edifício, quer em planta, quer em altura, podem resultar em distribuições de forças horizontais e deformações muito diferentes daquelas que surgem em estruturas regulares (Moehle & Mahin, 1991). Uma irregularidade estrutural muito comum em edifícios existentes surge ao nível os pisos inferiores, resultante da ausência de paredes de alvenaria para instalação de estacionamento, lojas, ou apenas opção arquitetónica. Isto fará com que estes apresentem uma rigidez inferior à dos restantes pisos, levando a uma concentração de esforços na transição entre o piso vazado e os pisos não vazados, originando deslocamentos relativamente grandes, entre as extremidades dos pilares. Esta supressão de elementos estruturais produz o mecanismo tipo *soft-storey* (Figura 2-10). Outra irregularidade estrutural frequente surge associada à alteração de posição, entre pisos consecutivos, dos elementos estruturais verticais, ou até mesmo de elementos não estruturais (Varum et al., 2005).



Figura 2-10 – Mecanismo tipo *soft-storey*. Fonte: Sismo em L'Aquila, Itália (2009) e sismo em Izmit, Turquia (2011).

## **2.6 Comentários finais**

Atualmente o betão armado corresponde ao material mais usado na construção, principalmente nos países mais desenvolvidos. Em regiões sísmicas no projeto deste tipo de estruturas devem ser considerados alguns cuidados que podem condicionar o seu comportamento perante a ação sísmica. Sismos recentes têm demonstrado que certas falhas estruturais estão relacionadas com as causas mais frequentes de danos e colapso de edifício de betão armado, portanto a identificação destas carências estruturais é essencial para definir estratégias de reforço com vista ao aumento da resistência sísmica dos edifícios. A resposta sísmica de um edifício depende das condições externas, como a relação do edifício com outros adjacentes e topografia local, e de condições internas, como a ligação entre elementos, graus de redundância, uniformidade em planta, simetria e retangularidade, continuidade e regularidade em altura.

A avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios existentes na perspetiva da mitigação do risco sísmico deve ter algum cuidado em relação aos aglomerados de construções em centros urbanos, visto que a maior parte da população vive em centros urbanos localizados nas grandes cidades o que levará a que essa população esteja sujeita a um maior risco sísmico. De forma a contribuir para uma redução os impactos sujeitos pelos sismos, é necessária uma implantação de um programa eficaz de gestão de risco que integra a mitigação do risco e a preparação para lidar com as consequências.

No capítulo seguinte será apresentado uma revisão das várias metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica, em que serão descritos os tipos vulnerabilidade existente, os métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica e a sua aplicabilidade.



## **CAPÍTULO 3**

---

# **METODOLOGIAS DA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE SÍSMICA**



## **Capítulo 3. Metodologias da avaliação da vulnerabilidade sísmica**

### **3.1 Enquadramento**

O desenvolvimento de métodos de avaliação da vulnerabilidade tem como finalidade relacionar um determinado nível de ação sísmica com as características das construções e avaliar os eventuais danos. Várias propostas de classificação foram apresentadas por diferentes autores, no entanto, tendo em conta o conhecimento base do qual derivaram, todas elas convergem na identificação de 3 tipos – Metodologias baseadas na vulnerabilidade sísmica, metodologias de análise baseados em modelos simplificados e metodologias de análise detalhada.

Neste capítulo será elaborado uma revisão sobre os métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica. Serão descritos, resumidamente, os tipos de vulnerabilidade estrutural existentes, os métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica e a sua aplicabilidade, de forma a construir uma tabela de confronto entre os mesmos.

### **3.2 Metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica**

As metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios diferem nos recursos e no rigor associados à sua implementação, portanto a escolha da metodologia a usar deverá ser feita em função do objetivo da avaliação, mas também da disponibilidade dos meios tecnológicos, da informação do edifício e da escala a que vai ser trabalhado.

A sequência pela qual os métodos de avaliação serão apresentados respeita os critérios de esforço computacional associado à implementação de cada método. Os primeiros são os métodos de avaliação desenvolvidos na base da vulnerabilidade observada, seguidos pelos métodos baseados em modelos simplificados e por fim serão apresentados de forma breve os métodos de análise detalhada. Dentro de cada grupo serão ainda apresentadas propostas desenvolvidas por diferentes autores.

#### **3.2.1 Metodologias baseadas na vulnerabilidade observada**

A *Federal Management Agency (FEMA)* fundou uma organização denominada por *Applied Technology Council (ATC)* que serviu como estudo pioneiro para a avaliação da vulnerabilidade sísmica a larga escala, no qual se destaca o módulo ATC-13 que teve como objetivo fazer uma avaliação dos danos após o sismo de 1985 na Califórnia (Rojahn & Sharpe, 1985).

Deste ATC-13 resultou a criação de uma matriz de probabilidade de dano (MPD), para 78 estruturas diferentes, entre as quais 40 edifícios. A particularidade deste método é que as MPD, relativas a diferentes tipologias estruturais e intensidades sísmica, foram estipuladas através da opinião de 78 especialistas, cada um deles fornecendo uma estimativa do grau de dano mais provável numa determinada tipologia estrutural, para uma determinada intensidade sísmica. A fraqueza desta metodologia prende-se com a óbvia subjetividade associada à forma como são elaboradas as MPD, facto que leva a que os resultados obtidos não possam ser considerados inteiramente credíveis. No entanto, esta metodologia foi uma das ferramentas mais utilizadas durante os anos 80. Na Tabela 3-1 apresenta-se a matriz de probabilidade de dano mais popular naquela época para definir probabilidades de distribuição de dano (D'Ayala & Speranza, 2002; T. Ferreira, 2009).



Tabela 3-1 - Formato da matriz de probabilidade de dano (Whitman, Reed, & Hong, 1974)

Estado de dano	Dano Estrutural	Dano não Estrutural	Rácio de dano (%)	Intensidade sísmica				
0	Nenhum	Nenhum	0-0.05	V	VI	VII	VIII	IX
1	Nenhum	Ligeiro	0.05-0.3	–	–	–	–	–
2	Nenhum	Localizado	0.3-1.25	–	–	–	–	–
3	Não assinalável	Distribuído	1.25-3.5	–	–	–	–	–
4	Ligeiro	Substancial	3.5-4.5	–	–	–	–	–
5	Substancial	Extensivo	7.5-20	–	–	–	–	–
6	Elevado	Quase total	20-65	–	–	–	–	–
7	Pré-Ruína		100	–	–	–	–	–
8	Colapso		100	–	–	–	–	–

Com o objetivo de melhorar e acelerar as inspeções de dano pós-sismo, foram elaboradas duas metodologias semelhantes, formuladas através de escalas macrossísmicas: a *Seismic intensity scale* (MSK) (Medvedev & Sponheuer, 1969) e a *European Macrosseismic scale* (EMS) (Grünthal, 1998). A escala macrossísmica MSK define três classes de vulnerabilidade decrescente A, B e C, tendo em consideração as características dos edifícios (Tabela 3-2), os autores criaram uma tabela (Tabela 3-5) em que relaciona o tipo de edifício com a escala de intensidade para obter uma possível classificação do dano dos edifícios (Tabela 3-3) e ainda com a quantidade de edifícios que pode ser afetado (Tabela 3-4).

Tabela 3-2 - Definição das classes de vulnerabilidade das construções segundo a escala MSK (Medvedev & Sponheuer, 1969)

Classe	Definição
A	Construção em pedra natural (não aparelhada) e blocos de terra crua (adobe). Amplamente utilizado em edifícios de habitação e que são mais sujeitos a maiores danos
B	Construção com blocos comuns e blocos de pedra aparelhada ou artificial. Utilizado em edifícios de habitação com um comportamento sísmico melhorado devido à utilização de melhores materiais na constituição das alvenarias
C	Construção em estrutura de betão armado

**Tabela 3-3 – Classificação do dano dos edifícios (Medvedev & Sponheuer, 1969)**

<b>Escala de dano</b>	<b>Tipo de dano</b>
<b>1</b>	Dano leve – Presença de Pequenas fissuras.
<b>2</b>	Dano moderado – Presença de fendas em paredes divisórias, queda de estuques.
<b>3</b>	Dano severo – Grandes fissuras em paredes divisórias, queda de chaminés.
<b>4</b>	Dano muito grave – Grandes aberturas nos elementos estruturais.
<b>5</b>	Colapso – Colapso total dos edifícios.

**Tabela 3-4 – Definição de quantidade de dano que os edifícios estão sujeitos à ação sísmica (Medvedev & Sponheuer, 1969)**

<b>Definição</b>	<b>Quantidade</b>
<b>Poucos</b>	Cerca de 5%
<b>Muitos</b>	Cerca de 50%
<b>Bastantes</b>	Cerca de 75%

**Tabela 3-5 –Relação entre o tipo de estruturas com a escala de intensidade para obter uma possível classificação do dano dos edifícios segundo (Medvedev & Sponheuer, 1969)**

<b>Escala de Intensidade</b>	<b>Tipo de estruturas</b>		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>V</b>	Poucos – 1	-	-
<b>VI</b>	Poucos – 2 Muitos – 1	Poucos – 1	-
<b>VII</b>	Poucos – 4 Muitos – 3	Muitos – 2	Muitos – 1
<b>VIII</b>	Poucos – 5 Muitos – 4	Poucos – 4 Muitos – 3	Poucos – 3 Muitos – 2
<b>IX</b>	Muitos – 5	Poucos – 5 Muitos – 4	Poucos – 4 Muitos – 3
<b>X</b>	Bastantes – 5	Muitos – 5	Poucos – 5 Muitos – 4

A escala macrossísmica proposta por (Grünthal, 1998), EMS-98, foi criada com intenção de melhorar a escala de intensidade MSK, que classificava os edifícios em três classes de avaliação, A, B e C, passando agora a classificar as estruturas em seis classes de avaliação diferentes (A, B, C, D, E e F) como pode ser vista na Figura 3-1. Esta proposta por estar definida numa escala macrossísmica permite ser relacionada com o grau de dano indiretamente (Vicente, 2008).

TIPO DE ESTRUTURA		Classe de Vulnerabilidade					
		A	B	C	D	E	F
ALVENARIA	Alvenaria de pedra irregular e solta	○					
	Adobe	○—					
	Alvenaria de pedra (aparelhada)	---○					
	Alvenaria de pedra aparelhada (silhares)		---○---				
	Alvenaria de blocos de betão ou tijolo (não reforçada)	---○---					
	Alvenaria com pavimentos em betão armado		---○---				
	Alvenaria reforçada/Alvenaria confinada			---○---			
BETÃO ARMADO	Estrutura porticada em betão armado sem CSR ou com CSR mínimo <sup>1</sup>	-----○---					
	Estrutura porticada em betão armado com CSR moderado		-----○---				
	Estrutura porticada em betão armado com CSR elevado			-----○---			
	Estrutura de paredes em betão sem CSR ou com CSR mínimo	---○---					
	Estrutura de paredes em betão armado com CSR moderado		---○---				
	Estrutura de paredes em betão armado com CSR elevado			---○---			
METÁLICA	Estrutura metálica			-----○---			
MADEIRA	Estrutura de madeira		-----○---				
<sup>1</sup> CSR – Conceção sísmo-resistente							
○ classe mais provável		-----○---	margem para classe menos provável		-----○---	margem de classe provável	

Figura 3-1 – Definição das classes de vulnerabilidade segundo o EMS-98 [adaptado de Grünthal, 1998]. Fonte : (Vicente, 2008)

Apesar do elevado grau de incerteza associado às classes de vulnerabilidade descritas, o principal método Italiano de avaliação da vulnerabilidade sísmica, desenvolvido em 1991 pelo Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT), assenta em dois níveis de seleção, nível 1 e 2 (GNDT-SSN, 1994). Esta metodologia foi utilizada em 1980 após o sismo de Irpinia em Itália e baseou-se nas classificações preliminares dos edifícios, de acordo com uma escala predefinida de 13 tipologias construtivas. Devido à vasta quantidade de informação, foi possível desenvolver diagramas com valores de dano provável (D'Ayala & Speranza, 2002; T. Ferreira, 2010).

Esta metodologia apresenta importantes limitações como a vastidão de classes de edifícios a considerar e a forma pouco rigorosa como cada uma dessas classes é definida. Todas as incertezas e imprecisões conduzem à obtenção de curvas de vulnerabilidade incorretas (T. Ferreira, 2010).

### **3.2.2 Metodologias de análise baseadas em modelos simplificados**

Tornando-se impossível a formulação de curvas de vulnerabilidade sem a realização de observações e inspeções do dano pós-sísmico, é necessário utilizar outros métodos para avaliar a vulnerabilidade dos edifícios. Estes deverão ser capazes de analisar também um grande número de edifícios, num curto espaço de tempo. Na grande maioria dos casos, quanto mais simples for o método, menor será o tempo consumido e menor será o rigor da elaboração dos cenários sísmicos. No entanto, os resultados devem permanecer fidedignos, daí que os poucos parâmetros necessários tenham de garantir uma adequada capacidade de avaliação do comportamento perante a ação sísmica dos edifícios (T. Ferreira, 2009). Ao longo dos últimos anos tem surgido metodologias simplificadas de avaliação da vulnerabilidade sísmica que envolvem procedimentos de caráter simples e rápido. Entre elas destacam-se algumas como a metodologia P25 Scoring method proposta por Ball (2005), metodologia proposta por Sucuoglu e Yazan (2003), metodologia proposta por Yakut (2007), “*Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards*” (RVS) proposta pela entidade ATC 21 (1988), metodologia proposta por Hirosawa (1993), metodologia proposta por Rai (2008) e metodologia GNDT II (1994).

A metodologia *P25 Scoring Method* proposta inicialmente por Bal (2005) e posteriormente desenvolvida e calibrada por um projeto de investigação suportado pelo *TUBITAK* (Conselho Turco de Pesquisa Científico e Técnico) (Tezcan, Bal, & Gulay, 2009). Trata-se de uma metodologia de avaliação rápida e eficaz que foi desenvolvida e testada inicialmente em 26 casos diferentes, a fim de se prever a vulnerabilidade de colapso de edifícios de betão armado, através da análise de vários parâmetros estruturais dos edifícios. Este método baseia-se, numa primeira abordagem, na observação e análise dos parâmetros estruturais mais importantes que afetam a resposta e o desempenho sísmico de um edifício. De forma a aplicar esta metodologia são avaliadas diferentes características estruturais dos

edifícios, tais como: a dimensão em planta; altura do pé direito; altura total do edifício; configuração em planta do rés-do-chão; dimensões dos elementos estruturais; aceleração efetiva do solo; fator da importância do edifício; condições do solo de fundação; qualidade do material; zonas de confinamento dos pilares; irregularidades estruturais como pilares curtos, torção, descontinuidades estruturais; e choque entre edifícios adjacentes (Bal, Tezcan, & Gulay, 2006; L. Rodrigues, 2009).

A metodologia apresentada por Sucuoglu e Yazgan (1999) faz a análise da vulnerabilidade sísmica de edifícios existentes em betão armado com altura inferior a 8 pisos, sendo que a sua avaliação está dividida em dois níveis, cujos parâmetros de análise podem ser facilmente observados (Sucuoglu & Yazgan, 1999; L. Rodrigues, 2009):

- No primeiro nível de avaliação, é feito uma observação visual do edifício onde são registados vários parâmetros, como o número de pisos acima do solo, a existência ou não de *soft-storey*, a existência de pisos exteriores suspensos, tais como varandas, a qualidade aparente do betão (boa, moderada ou má), a existência de mecanismos do tipo pilar-curto, a possibilidade de existência de efeitos de *pounding* entre edifícios adjacentes, as condições do solo e, por fim, o efeito topográfico no edifício;
- No segundo nível de avaliação, após o primeiro nível, serão analisados alguns parâmetros tais como a irregularidade em planta, o índice de resistência a forças laterais e a redundância estrutural. Por forma a finalizar a avaliação da vulnerabilidade do edifício, as acelerações sísmicas no solo servirão como *basic score* para o calculo do valor do desempenho sísmico, estando este dependente da zona sísmica em que se encontra. Através de uma interação entre os diferentes parâmetros referidos obtém-se o valor do desempenho sísmico do edifício, sabendo-se assim se este compromete ou não a segurança das pessoas que lá se encontram.

A metodologia proposta por (Yakut, Erberik, Akkar, & Sucuoglu, 2012) surgiu do procedimento desenvolvido por Sucoglu e Yazgan (2003), ao qual são acrescentados novos parâmetros de avaliação e um tratamento de risco sísmico diferente. Nesta metodologia, para além dos parâmetros mencionados em cima, o *basic score* contém ainda diferentes

estruturas dos edifícios de betão armado, servindo como modificador do valor do desempenho sísmico do edifício.

A metodologia simplificada de avaliação da vulnerabilidade sísmica “*Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards*” (RVS), referido como ATC 21 (ATC-21, 2002), proposto por essa entidade em 1988. Cerca de uma década mais tarde, em 1999, o FEMA publicou o manual FEMA 154 e, em 2002, surge a segunda edição deste manual (ATC-21, 2002) uma versão elaborada com o intuito de facilitar a implementação do RVS e fazer uma revisão da metodologia, com base em informações reunidas após a primeira edição. A inspeção a um edifício, que envolve uma identificação por parte dos inspetores, do sistema estrutural que resiste às ações laterais e o reconhecimento das características do edifício que alteram a resposta sísmica esperada para esse sistema.

O procedimento para o cálculo estrutural consiste numa matriz de valores (*Basic structural hazard scores*), que variam consoante o tipo de sistema estrutural, resistente às ações laterais, dos edifícios em estudo e os respectivos materiais. O valor final (*Final structural score*) é conseguido pela adição ou subtração de fatores modificadores de desempenho (*Score Modifiers*), caso sejam detectadas certas características das construções que alteram o comportamento sísmico esperado do sistema estrutural. Todos os valores da matriz estão relacionados com a probabilidade de colapso do edifício. Os *Final Score* situam-se, habitualmente, entre 0 e 7, sendo que um valor mais elevado corresponde a um melhor desempenho sísmico (ATC-21, 2002; C. Ferreira, 2008)

A metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica proposta por Hirosawa (1993) serve tanto para a avaliação de edifícios betão armado pré-sismo, como para edifícios danificados após um evento sísmico, avaliando diferentes parâmetros como o número de pisos, a rigidez e ductilidade dos elementos estruturais, a área da secção transversal de elementos estruturais e não estruturais, entre outros. A vulnerabilidade é calculada para cada um dos pisos do edifício e para ambas as direções longitudinais e transversais. Esta depende de vários parâmetros, como a configuração estrutural do edifício, a deterioração causada pela idade do edifício e um sub-índice sísmico da estrutura, que depende da resistência e ductilidade. Esta metodologia é composta por três níveis de avaliação, independentemente do nível, o conceito básico é comum nos três (Hirosawa, Sugano, & Kaminosono, 1993; L. Rodrigues, 2009):

- No primeiro nível, o índice de desempenho sísmico é quantificado de forma simplificada, através do cálculo do índice sísmico básico, o qual é determinado através do somatório do produto das secções transversais dos vários elementos estruturais, com base nas suas respetivas tensões médias resistentes. Caso o índice de desempenho sísmico seja maior que o índice associado à estrutura, verifica-se que o edifício responde com segurança a este tipo de solicitação, caso contrario não verifica a segurança. Caso seja inclusivo, passa-se para o próximo nível.
- No segundo nível, para determinação do Índice de desempenho Sísmico, a resistência e ductilidade dos elementos verticais é explorada até à sua resistência máxima, para cada modo de rotura (por corte e flexão). Sendo, portanto, o valor mais desfavorável utilizado, considerando que as lajes e as vigas são consideradas indeformáveis. Caso o índice de desempenho sísmico seja maior que o índice associado à estrutura, verifica-se que o edifício responde com segurança a este tipo de solicitação, caso contrario não verifica a segurança. Caso seja inclusivo, passa-se para o próximo nível.
- Por último, no terceiro nível, o grau de complexidade de cálculo aumenta, quer para a obtenção do índice de desempenho sísmico, quer para determinação do índice dos elementos não estruturais. Caso o índice de desempenho sísmico seja maior que o índice associado à estrutura, verifica-se que o edifício responde com segurança a este tipo de solicitação, caso contrario não verifica a segurança. Caso seja inclusivo, é feita análise dinâmica ou outra investigação.

A metodologia proposta por Rai (2008) é baseada numa abordagem prescritiva de engenharia que está de acordo com a prática Indiana, derivando de metodologias como *ATC 40*, *FEMA 310*, *FEMA 273* (atual *FEMA 356*), *UCBC* (atual *GSREB*) de *ICBO*, *ASCE 31-03*, Eurocódigo 8 e nova norma Neozelandesa. Para além de permitir a avaliação sísmica de edifícios de betão armado, esta metodologia fornece também um método para avaliar a capacidade de um determinado edifício obter níveis de desempenho adequados. De acordo com esta metodologia, a avaliação sísmica de um edifício é um processo que pode ser dividido em dois passos (Rai, 2008; L. Rodrigues, 2009):

- Avaliação preliminar – Avaliação global da vulnerabilidade sísmica, isto é, verificações relacionadas com a resistência e com a configuração. Se os critérios forem aceites não será necessário reforço, caso contrário, é necessário reforço;
- Avaliação detalhada – avaliação efetuada quando os resultados não são satisfatórios na avaliação preliminar, isto é, verificação geral para uma resistência a forças laterais e avaliação complementar ao edifício. Se os critérios forem aceites não será necessário reforço, caso contrário é necessário reforço.

A metodologia de (GNDT-SSN, 1994), iniciada em 1976, foi aplicada a vários centros históricos de diversas regiões de Itália, nomeadamente na região da Catania em 1999 e na região de Molise em 2001. Esta metodologia baseia-se num vasto estudo e levantamento de danos pós-sismo, que teve em atenção outros parâmetros importantes que controlam a construção de danos e devem ser pesquisados individualmente. Tem como base o cálculo de um índice de vulnerabilidade ( $I_v$ ) (Equação 3.1) a partir da soma ponderada de 11 parâmetros, considerados importantes no controlo dos danos em edifícios devidos às ações sísmicas.

$$I_v = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} \times P_i \quad (3.1)$$

Os parâmetros da metodologia do GNDT II são: i) tipo de sistema estrutural; ii) qualidade do sistema estrutural; iii) resistência convencional; iv) localização e condições do solo; v) diafragmas horizontais; vi) configuração em planta; vii) configuração em altura; viii) distância máxima entre paredes; ix) tipo de cobertura; x) elementos não estruturais; e xi) estado de conservação.

### **3.2.3 Metodologias de análise detalhada**

As metodologias de análise detalhada são apenas aplicadas a edifícios que apresentam rigorosa informação sobre o próprio, nomeadamente no que diz respeito à geometria dos seus elementos, das tecnologias construtivas envolvidas e das propriedades mecânicas dos seus materiais. Para estas situações recorre-se a modelos numéricos pormenorizados para



avaliar edifícios representativos de uma determinada tipologia estrutural, com um grau de detalhe que não se adequaria a uma avaliação de um cenário sísmico pois teria de abranger um grande número de edifícios. Os procedimentos de análise podem ser divididos em análise estática lineares, análise estática não-lineares, análise dinâmicas lineares e análise dinâmicas não-lineares (T. Ferreira, 2009; Lang, 2002).

- 1) Análise estática linear - É utilizada para o dimensionamento e conceção de estruturas, e está considerada na maioria dos códigos de dimensionamento e verificação da segurança sísmica. A limitação desta análise é o facto de ser adequada para o estudo de edifícios regulares;
- 2) Análise estática não-linear - A grande vantagem desta análise é a maior aproximação em termos de esforços e deformações provocadas pela ação sísmica, devido à contabilização dos efeitos da não linearidade do comportamento material. No entanto, estes métodos só são válidos para edifícios regulares, em que o primeiro modo de vibração é preponderante na resposta da estrutura;
- 3) Análise dinâmica linear - A grande vantagem destes métodos está na consideração de modos de vibração mais ajustados para edifícios irregulares;
- 4) Análise dinâmica não-linear - A ação sísmica é modelada por histogramas temporais de movimento e a resposta da estrutura é determinada com base em procedimentos de integração passo a passo. Este é o procedimento mais completo no cálculo de forças internas e deslocamentos de estruturas sujeitas à ação sísmica.

### 3.3 Escolha da metodologia adotada e comparação entre as várias metodologias

Esta breve apresentação das várias metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica permite retirar algumas conclusões sobre o tipo de análise que cada uma faz. Como referido anteriormente, a escolha da metodologia de avaliação a utilizar dever-se-á ter em atenção a natureza do edifício, da escala a que é aplicado e dos recursos que consome (Tabela 3-6).

Tabela 3-6 - Metodologias de avaliação da vulnerabilidade sísmica aplicadas a diferentes escalas (T. Ferreira, 2009)

Metodologia	Campo de aplicação		Esforço computacional		
	Grupo de edifícios	Edifício individual	Baixo	Moderado	Elevado
Vulnerabilidade observada	x		x		
Modelos de análise simplificada	x	x		x	
Análise detalhada		x			x

Como na presente dissertação pretende-se fazer a avaliação da vulnerabilidade de grandes áreas urbanas, os métodos simplificados serão os que se melhor enquadram para essa análise. As metodologias são classificadas de forma diferente por diversos autores em função das estratégias de avaliação, destacando que a sua combinação poderá ser favorável em favor do rigor e confiança dos resultados dos estudos de avaliação da vulnerabilidade sísmica. A Tabela 3-7 apresenta o confronto dos vários parâmetros estruturais de cada metodologia de avaliação sísmica anteriormente mencionada.

Tabela 3-7 – Confronto entre os parâmetros estruturais de cada metodologia de avaliação sísmica analisada.

<div>Metodologias</div> <div>Parâmetros</div>	P25 Scoring Method (2005)	Rai (2008)	Sucuoglu and Yazgan (2003)	Hirosawa (1993)	Yakut et al (2007)	RVS (2002)	GNDT II (1994)
<b>Torção</b>	x	x	x	x	x	x	x
<b>Diferentes alturas entre pisos</b>	x	-	-	-	-	-	x
<b>Qualidade do material de construção</b>	x	-	-	x	x	-	x
<b>Pilar curto</b>	x	x	-	-	x	x	-
<b>Soft-storey</b>	x	x	x	x	x	x	x
<b>Pounding</b>	x	x	x	-	x	x	-
<b>Tipo de solo</b>	x	-	x	x	x	x	x
<b>Topologia do terreno</b>	x	-	x	-	x	-	x
<b>Irregularidade em altura</b>	x	-	-	x	x	x	x
<b>Irregularidade em planta</b>	x	-	x	x	x	-	x

### **3.4 Comentários finais**

Este capítulo serviu para fazer uma síntese do que se tem vindo a realizar no âmbito de diversos estudos de avaliação da vulnerabilidade sísmica, procurando descrever os procedimentos que estão na base de algumas metodologias aplicadas em vários países. As metodologias baseadas na observação exigem grande dispêndio de tempo e são excessivamente particulares. As metodologias de análise baseados em modelos simplificados são capazes de analisar um grande número de edifícios, num curto espaço de tempo. Para que os resultados devam permanecer fidedignos, os parâmetros terão de garantir uma adequada capacidade de avaliação do comportamento perante a ação sísmica dos edifícios. Por fim, as metodologias de análise detalhada são apenas aplicadas a edifícios que apresentam rigorosa informação sobre o próprio, nomeadamente no que diz respeito à geometria dos seus elementos, das tecnologias construtivas envolvidas e das propriedades mecânicas dos seus materiais.

O objetivo desta dissertação passa pela avaliação um conjunto de edifícios de betão armado, localizados em meio urbano e que foram sujeitos ao impacto dos sismos, optou-se pela elaboração de uma metodologia de análise baseada em modelos simplificados. Deste modo, a avaliação da vulnerabilidade sísmica de um determinado edifício é realizada com base no conhecimento de alguns parâmetros, tornado assim o método rápido e simples para o rastreio do risco sísmico em larga escala. Para que os resultados obtidos permaneçam fidedignos é necessário que os parâmetros escolhidos sejam obtidos com qualidade, garantindo desta forma uma adequada capacidade de avaliação do comportamento sísmico dos edifícios.

No capítulo seguinte será proposto uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios de betão armado com base na metodologia de modelos simplificados tratados neste capítulo, com os referentes parâmetros usados e a sua aplicabilidade.

## **CAPÍTULO 4**

---

# **AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE EDIFÍCIOS EM BETÃO ARMADO**



## Capítulo 4. Avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios em betão armado

### 4.1 Enquadramento

Como foi mencionado no Capítulo 3, na escolha da metodologia de avaliação da vulnerabilidade a utilizar, dever-se-á ter em atenção a natureza dos edifícios, a sua função e a sua tipologia construtiva. A análise diferenciada destes tipos de edifícios, no que diz respeito aos aspetos a avaliar, é orientada por diferentes critérios e sensibilidades que terão repercussão na avaliação da vulnerabilidade e, consequentemente, na estimativa do grau de dano.

O presente capítulo é dedicado à formulação de uma nova metodologia simplificada para o estudo da vulnerabilidade sísmica de edifícios de betão armado, tendo por base a metodologia apresentada por Vicente (2008) para edifícios de alvenaria de pedra. Nesta metodologia vão ser analisados 8 parâmetros, sendo que os parâmetros encontram-se divididos em três grupos: solo, localização do edifício no enquadramento urbano e edifício individual. O primeiro grupo inclui o parâmetro P1, onde será analisada a implantação do edifício no solo. O segundo grupo inclui o parâmetro P2, que trata essencialmente a interação entre construções vizinhas. Por fim, o terceiro grupo inclui os parâmetros P3 ao P8, onde será analisada a idade do edifício, as suas irregularidades em planta e em altura, a existência de potenciais mecanismos de *soft-storey* e de pilares curtos e de outros elementos constituintes do comportamento sísmico do edifício. Toda a informação está apresentada no Anexo I em formato de *handbook*.

## **4.2 Vulnerabilidade sísmica**

Segundo Sandi & Floricel (1995), a vulnerabilidade sísmica pode ser definida como uma propriedade intrínseca das estruturas, uma característica do seu próprio comportamento sendo sujeitas à ação sísmica, descrita através de uma lei causa-efeito em que a causa é ação sísmica e o efeito é o dano estrutural. Sismos recentes têm contribuído para o desenvolvimento de modelos mais eficientes na avaliação do comportamento das estruturas. Dependendo das características do uso, tipo e valor do edifício, os diferentes níveis de avaliação da vulnerabilidade assumem uma importância relativa, ou seja, tanto os objetivos da avaliação da vulnerabilidade como a profundidade com que é conduzida esta avaliação, serão sempre definidos em função da exposição e das preocupações socioeconómicas (Vicente, 2008). Descrevem-se sumariamente os três níveis de vulnerabilidade associados aos edifícios:

- i. **Vulnerabilidade estrutural**, associada à suscetibilidade dos elementos ou componentes que formam o sistema resistente, sofrerem determinado grau de dano. A natureza desse dano pode ser descrita de forma quantitativa, utilizando parâmetros definidores da resposta estrutural e definindo os índices de dano, ou qualitativa, recorrendo à observação visual e descrição de danos característicos após um sismo (Yepez, Barbat Barbat, & Canas Torres, 1995).
- ii. **Vulnerabilidade não estrutural**, associada à suscetibilidade dos elementos arquitetónicos (paredes divisórias, portas, janelas, elementos decorativos, etc.) e componentes do edifício (instalações e equipamentos) sofrerem danos (Staehlin, 1997).
- iii. **Vulnerabilidade funcional**, definida como uma potencial perturbação de funcionamento de uma instalação, em consequência do aumento da exigência sobre os serviços prestados. Pretende-se avaliar a capacidade de resposta pós-sismo dos edifícios considerados essenciais como hospitais, escolas, quartéis de bombeiros ou esquadras de polícia, sobre os quais é exigida manutenção de funções. A funcionalidade dos edifícios essenciais depende de alguns fatores, como: a



distribuição de atividades dentro dos espaços do edifício, a ausência de um plano de emergência e de evacuação, os inadequados meios de resposta a situações de emergência e ainda falha dos sistemas de comunicação, sinalização e acessibilidades (OPS, 1993).

Neste trabalho dar-se-á maior relevo ao estudo da vulnerabilidade estrutural. Assim, no que se segue, será tratado em detalhe apenas este nível de vulnerabilidade. De modo a avaliar esta vulnerabilidade proceder-se-á a uma visualização exterior do edifício em estudo, sendo que, tal como foi já referido anteriormente, este está dividido em 3 grupos: terreno, quarteirão e edifício (Vicente, 2008):

- 1) Terreno – O terreno é um elemento que pode comprometer o desempenho de um edifício perante um sismo, pois o solo em que este se encontra fundado pode amplificar a ação sísmica. Inversamente, a capacidade resistente das fundações pode mitigar este impacto, razão pela qual a avaliação do comportamento do solo de fundação é tido em conta no desenvolvimento desta metodologia.
- 2) Quarteirão – A avaliação da vulnerabilidade à escala do quarteirão permite identificar situações de risco originadas, ou até agravadas, pela interação entre as construções. As interações entre edifícios com altura diferentes dão origem a frequências de oscilação diferentes podendo levar a danos estruturais graves e até mesmo ao colapso da estrutura.
- 3) Edifício – Onde o objetivo fundamental é avaliar a vulnerabilidade estrutural do sistema resistente principal do edifício, avaliando explicita e implicitamente o desempenho de todos os componentes e materiais constituintes, bem como a eficácia das suas ligações.

Com a presente dissertação pretende-se dar o primeiro passo para o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica do edificado existente em betão armado.

### 4.3 Índice de vulnerabilidade sísmica dos edifícios de betão armado

Esta metodologia baseia-se no cálculo de um índice de vulnerabilidade para cada edifício, em que cada parâmetro é classificado em 4 classes de vulnerabilidade,  $C_{vi}$ , nomeadamente: A, B, C e D. Cada parâmetro avalia um aspeto que influencia o desempenho sísmico do edifício (escolhendo a classe de vulnerabilidade que melhor a caracteriza). A cada parâmetro é associado um peso,  $p_i$ , variando desde 0.5, para os parâmetros menos importantes, até 2, para os parâmetros com maior impacto na vulnerabilidade do edifício (Tabela 4-1). O valor do índice de vulnerabilidade final,  $I_v^*$ , varia entre 0 e 500. De forma a facilitar a sua interpretação, este índice é posteriormente normalizado para variar no intervalo entre 0 e 100 (soma ponderada normalizada), assumindo o símbolo  $I_v$ .

Tabela 4-1 - Índice de vulnerabilidade ( $I_v$ ), parâmetros que o definem e respetivos pesos associados

Parâmetro		Classe $C_{vi}$				Peso
		A	B	C	D	$p_i$
<b>P1</b>	Implantação do Edifício	0	5	20	50	1.5
<b>P2</b>	Posição no Quarteirão	0	5	20	50	0.5
<b>P3</b>	Idade do Edifício	0	5	20	50	1.5
<b>P4</b>	Irregularidade em Planta	0	5	20	50	2.0
<b>P5</b>	Irregularidade em Altura	0	5	20	50	2.0
<b>P6</b>	Existência de Mecanismo de Soft-storey	0	-	-	50	2.0
<b>P7</b>	Presença de Pilares Curtos	0	5	20	50	2.0
<b>P8</b>	Outros elementos	0	5	20	50	0.5

Em seguida, apresentar-se-ão os 8 parâmetros de avaliação da vulnerabilidade utilizados e as respetivas definições de classe de vulnerabilidade associadas a cada um deles.

### **Parâmetro P1: Implantação do edifício**

Aspetos a avaliar:

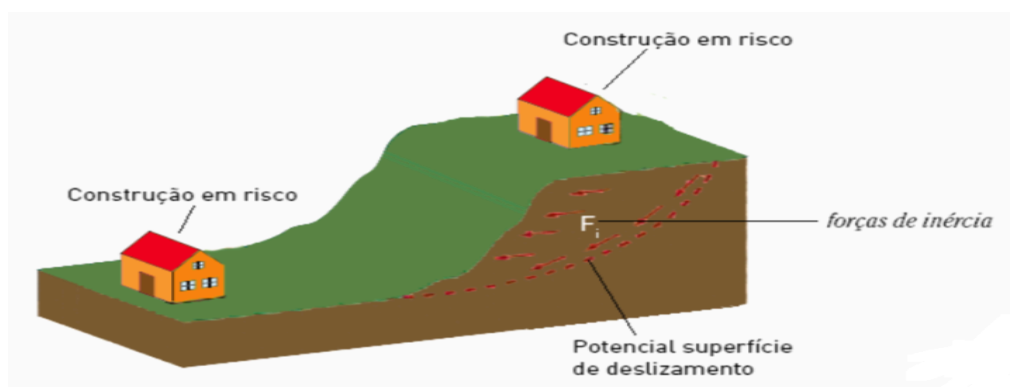
- Localização.
- Tipo de solo.

Como parâmetro inicial desta metodologia, as características do terreno onde o edifício está implantado são de grande importância. Em casos onde não está disponível informação detalhada do tipo de solo para cada edifício, e considerando a atendendo às dificuldades de avaliação da interação terreno-edifício, deve ser assumida uma classificação o mais correta possível (observação visual), adotando para todos os edifícios da zona em estudo a mesma classe de vulnerabilidade para este parâmetro, tal como sugerido por Vicente (2008). Embora seja difícil obter dados precisos durante a avaliação visual, os dados geotécnicos fornecidos pelas entidades locais, deverão ser uma fonte fiável para classificar as condições locais do solo. A designação usada para o tipo de solo está de acordo com a proposta no EC8 (CEN, 2004), classificando os terrenos como tipo A (melhor tipo de solo), B, C, D e E (pior tipo de solo), em que:

- Solo tipo A – Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 metros de material mais fraco à superfície.
- Solo tipo B – Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade.
- Solo tipo C – Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixo (cascalho) ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros.
- Solo tipo D - Depósitos de solo não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura.
- Solo tipo E – Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial.

Os solos do tipo S1 e S2 não são considerados porque estão associados a fenómenos de liquefação, os quais, neste primeiro nível de avaliação, não foram tidos em conta.

A implantação de edifícios deve ser feita em terrenos planos e afastados de grandes declives, pois esses edifícios vão ficar sujeitos ao risco de deslizamento de terra (Figura 4-1). Mediante uma análise de viabilidade económica, e de modo a evitar este desfecho, é possível proceder-se à estabilização da encosta.



**Figura 4-1 - Desmoronamento da encosta com projeção de pedras sobre a localidade (Sismo L'Aquila, Italia, 2009)**

**Fonte: (Bhatt, 2007)**

A construção em aterro (Figura 4-2) não é considerada como uma fonte de vulnerabilidade, pois, tipicamente são zonas sensíveis por serem passíveis de assentamentos. Um sismo provocará uma vibração do solo que poderá originar a sua compactação, produzindo assentamentos ou deslizamentos (Bhatt, 2007).

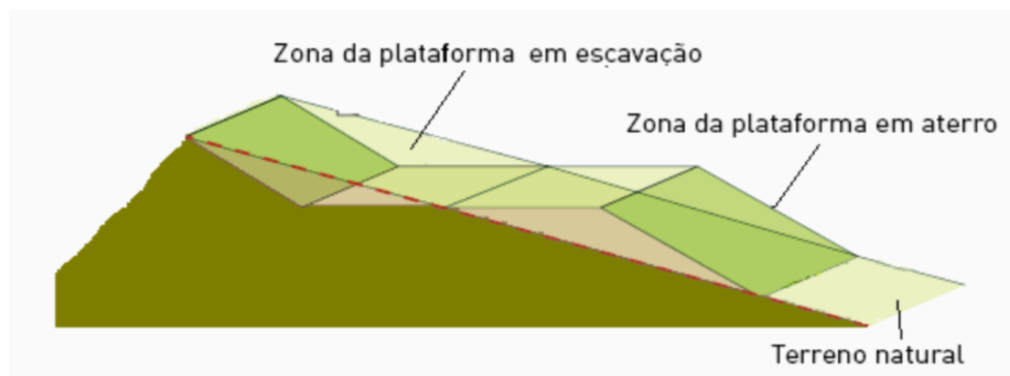


Figura 4-2 – Plataforma de aterro e escavação. Fonte: (Bhatt, 2007)

Para este parâmetro, a escolha da classe dependerá do tipo de solo onde o edifício está inserido e localização, isto é, se o edifício está em zona de aterro, zona plana ou em zona com terreno inclinado. Optou-se por unir o solo do tipo B com o C e o solo do tipo D com o E, pois como esta avaliação é apenas visual torna-se complicado aferir qual dos solos usar e, nesse sentido, esta união diminui a margem de erro. Assim, as classes de vulnerabilidade para estes parâmetros estão definidas como indicado na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P1

Terreno de fundação	Localização do Edifício		
	Terreno plano	Aterro	Solo inclinado
Solo do tipo A	A	B	C
Solo tipo do B e C	B	C	D
Solo tipo do D e E	C	D	D

## Parâmetro P2: Posição no quarteirão

Aspetos a avaliar:

- Posição do edifício.
- Interação com outros edifícios.
- Desníveis do pavimento superior a 0.5 metros entre edifícios adjacentes.

A interação entre edifícios contíguos inseridos num contexto urbano, quando exposto a um sismo, implica que a avaliação da sua vulnerabilidade não seja analisada de forma individual. A resposta do edifício é influenciada pela sua inserção num agregado de edifícios, podendo o confinamento e interação produzidas, atuar de forma benéfica ou prejudicial em determinadas situações, como no caso dos edifícios isolados, nos de banda extremo, nos de gaveto de quarteirões e nos edifícios em contacto com outros de dimensão diferente (Vicente, 2008). Estes exemplos estão ilustrados na Figura 4-3.

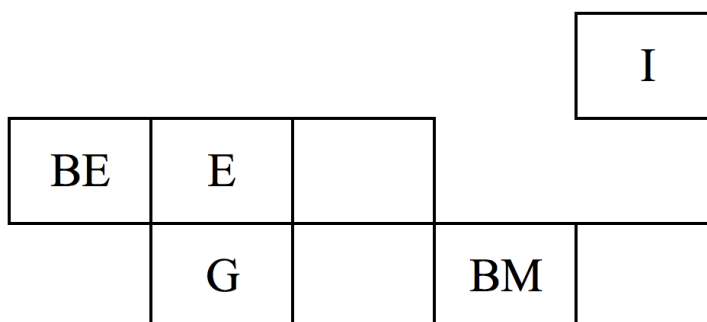
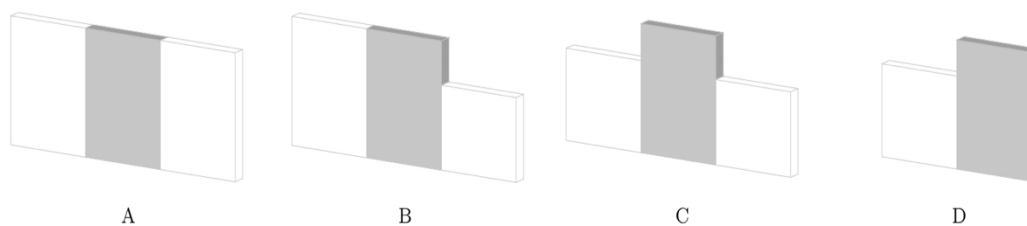


Figura 4-3 - Posição dos edifícios no agregado (BE - Banda Extremo, BM - Banda Meio, E - Enclausurado, G - Gaveto, I - Isolado). Fonte: (Vicente, 2008)

A interação entre edifícios origina o choque entre edifícios, efeito *pounding*, dificultando a análise sísmica das estruturas, devido à difícil quantificação da energia transmitida durante o choque. Devido a este fenómeno, os edifícios de topo de banda ou de canto dos quarteirões, como não encontram continuidade com outro edifício, vão ter à priori piores resposta sísmica (Bhatt, 2007). Na Figura 4-4, está demonstrada a localização do edifício no agregado e a classe atribuída ao mesmo. Para a classe A, considerou-se que os edifícios adjacentes são de igual altura. Para a classe B e C, o edifício está inserido no agregado em

que os edifícios adjacentes são de menor altura. O piso do edifício mais alto que colide com o mais baixo, é aquele que mais vai sofrer com o movimento dos edifícios, devido à ação horizontal dos mesmos (Cole, Dhakal, Carr, & Bull, 2010). Para a classe D, o edifício está localizado em banda extrema, sem continuidade, e o edifício com o qual contacta é de altura inferior.



**Figura 4-4 - Interação entre edifícios adjacentes com a respetiva classe de vulnerabilidade. Fonte: Ferreira (2015)**

O impacto entre edifícios provoca efeitos de maior gravidade do ponto de vista estrutural quando os pavimentos não se encontram ao mesmo nível. Na Figura 4-5, está exemplificado a altura mínima suficiente para originar este efeito. Uma diferença da altura da laje entre edifícios adjacentes de pelo menos 0.5 metros, já pode ser suficiente para originar este fenómeno (Vicente, 2008). Esta situação surge, por exemplo, quando a implantação dos edifícios é feita em terrenos inclinados (Yakut et al., 2012).

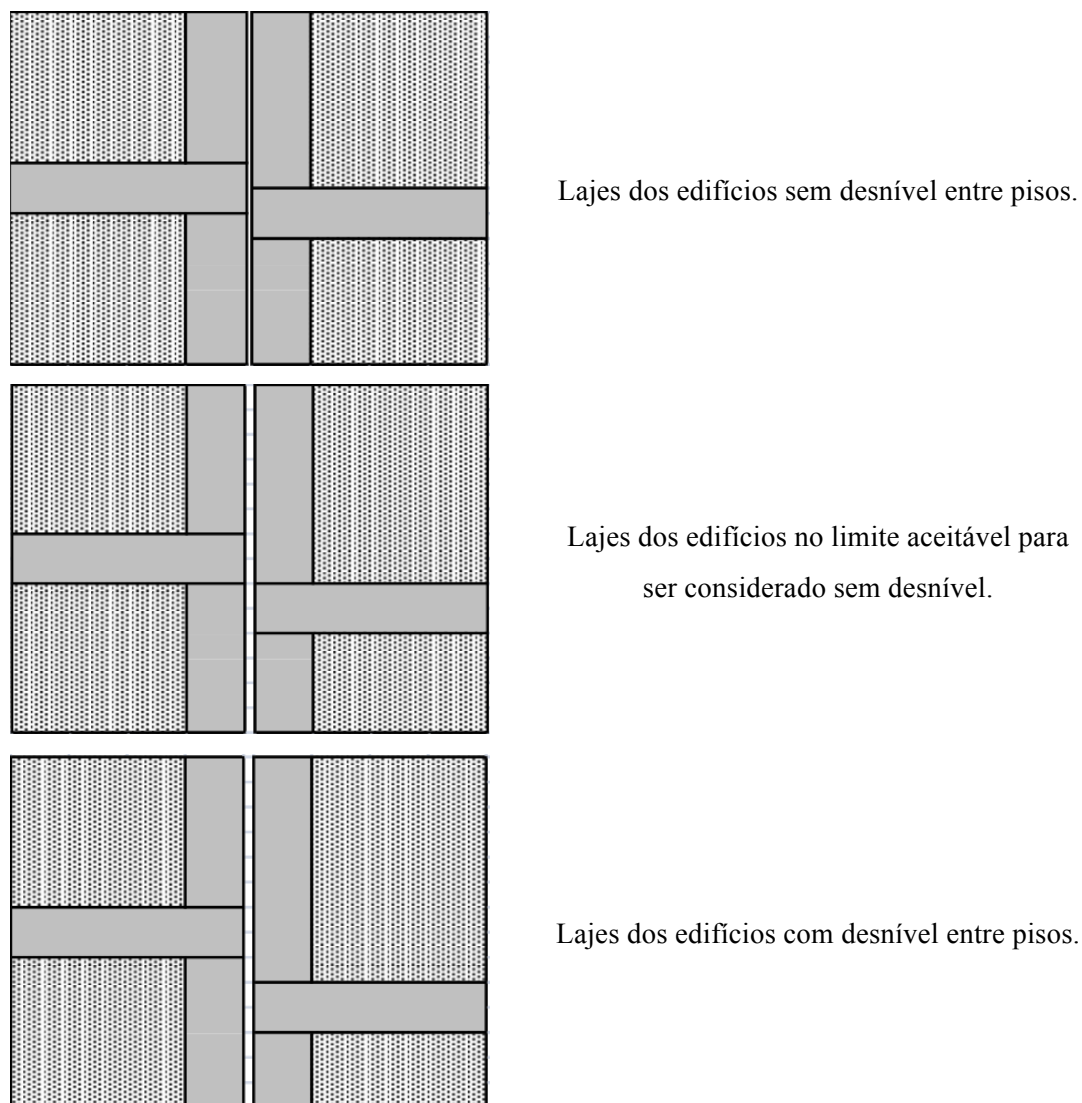


Figura 4-5 - Explicação dos limites do desnível dos pisos dos edifícios adjacentes. Fonte: Yakut et al.(2012)

Para este parâmetro, a classificação das classes de vulnerabilidade proposta apresenta-se na Tabela 4-3, em que a escolha da localização do edifício é atribuída à classe inicial.

Tabela 4-3 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P2

Classe	Localização
A	Edifício de banda meio
B	Edifício isolado
C	Edifício de gaveto
D	Edifício de banda extremo



A interação dos edifícios adjacentes será um fator de penalização da classe de vulnerabilidade atribuída anteriormente. Caso o edifício em análise se encontre numa situação como ilustrada na Figura 4-4, dever-se-á penalizar a classe de acordo com os critérios referidos anteriormente. Como exemplo, um edifício de banda meio tem uma classe inicial A. No entanto, caso se encontre localizado entre dois edifícios de diferentes alturas, a sua classe de vulnerabilidade deverá passar a classe C.

O desnível dos pavimentos é aplicável apenas nos casos em que a classe de vulnerabilidade não sofra alterações da interação dos edifícios adjacentes, deste modo evita-se que a classe um edifício agrave duas vezes. Como forma de penalização, com recurso à Figura 4-5, um edifício que tenha diferença de altura das lajes deverá ser penalizado na diminuição de um nível da sua classe de vulnerabilidade.

### **Parâmetro P3: Idade do edifício**

Aspetos a avaliar:

- Consideração da ação sísmica no projeto.
- Qualidade da construção.
- Parcialmente devoluto.

Este parâmetro pretende aferir em que regulamento sísmico o edifício em análise está enquadrado, procurando avaliar desta forma a sua resistência sísmica. Os primeiros edifícios de betão armado construídos em Portugal foram executados de modo pouco rigoroso no que respeita à consideração dos efeitos da ação sísmica. A ductilidade associada às estruturas não era levada em conta e a utilização betões de fraca resistência mecânica e com armaduras de aderência normal era recorrente. Com a falta de regulamentação sísmica nas construções, em 1951 surgiu o primeiro regulamento que estabelecia as condições necessárias à segurança sísmica das estruturas, o Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU).

Em 1958, surgiu o “Regulamento da Segurança das Construções contra os Sismos”, o primeiro especificamente dedicado aos sismos, veio complementar o Regulamento Geral

das Edificações Urbanas, que estabeleceu o zoneamento sísmico do território nacional em três zonas; obrigou à realização de uma verificação específica para as forças laterais e estabeleceu algumas condições qualitativas, nomeadamente, a introdução, em edifícios de pequeno porte, de elementos de confinamento, confinamento e de melhoria da ligação das paredes aos pavimentos, e a inclusão de alguns montantes de betão armado, entre outras. Na década de 60 começou-se a considerar os efeitos da ação sísmica no dimensionamento de estruturas, com o aparecimento e aprovação do Regulamento de Solicitações em Edifícios e Pontes (RSEP), em que foram introduzidos métodos de dimensionamento sísmico algo rudimentares, mas que já contabilizavam os efeitos da ação sísmica sobre as estruturas. Em 1983 é aprovado o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) que estabelece os princípios gerais de segurança que se deve verificar no projeto de estruturas e ao mesmo tempo que define as ações a considerar, entre as quais, a ação sísmica e o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP) que substituiu o Regulamento de Estruturas de Betão Armado (REBA) (C. Ferreira, 2008).

No início da década de oitenta, a Comissão das Comunidades Europeias lançou uma série de trabalhos que visavam a elaboração de um conjunto de regras técnicas – Os Eurocódigos Estruturais – que permitissem a harmonização do projeto estrutural de edifícios e de obras de engenharia em geral. Esta harmonização apresenta como principais objetivos estratégicos os seguintes pressupostos (Carvalho, 2004; Romãozinho, 2008):

1. Proporcionar critérios e métodos de projeto harmonizados, através da eliminação de barreiras técnicas à prestação de serviços.
2. Estabelecer uma base de entendimento comum entre donos de obra, promotores, utilizadores, projetistas, empreiteiros e fabricantes de materiais.
3. Facilitar as trocas de serviços de construção entre os vários Estados-Membros.
4. Facilitar a colocação no mercado de materiais, produtos e componentes estruturais para a construção.
5. Estabelecer uma base comum para a investigação e desenvolvimento no sector da construção.
6. Aumentar a competitividade internacional do sector da construção europeia.

Este trabalho foi conduzido inicialmente pela própria Comunidade Europeia sendo que, em 1989, esta responsabilidade foi transmitida para o Comité Europeu de Normalização (CEN). Os Eurocódigos Estruturais foram sendo publicados ao longo da década de 90, tendo em 1999 a Comissão Europeia mandatado de novo o CEN para elaborar o processo de conversão dos Eurocódigos em Normas Europeias definitivas.

Estes 9 Eurocódigos Estruturais, estando subdivididos em várias partes cada, cobrem os aspectos relativos à definição das ações, ao dimensionamento e pormenorização estrutural e aos conceitos gerais de segurança, para vários materiais estruturais.

A Tabela 4-4 refere de uma forma muito sucinta os vários Eurocódigos e o seu âmbito de aplicação, assim como o número de partes que compõe cada um destes:

**Tabela 4-4 - Os vários Eurocódigos Estruturais**

<b>Eurocódigo</b>	<b>Título/âmbito</b>
<b>Eurocódigo 0</b>	Bases de projeto
<b>Eurocódigo 1</b>	Ações e estruturas
<b>Eurocódigo 2</b>	Projeto de estruturas de betão
<b>Eurocódigo 3</b>	Projeto de estruturas de aço
<b>Eurocódigo 4</b>	Projeto de estruturas mistas aço-betão
<b>Eurocódigo 5</b>	Projeto de estruturas de madeira
<b>Eurocódigo 6</b>	Projeto de estruturas de alvenaria
<b>Eurocódigo 7</b>	Projeto geotécnico
<b>Eurocódigo 8</b>	Projeto de estruturas sísmo-resistentes

Com base no exposto, a classificação proposta para este parâmetro apresenta-se na Tabela 4-5:

**Tabela 4-5 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P3**

<b>Classe</b>	<b>Intervalo de tempo da construção do edifício</b>
<b>A</b>	Edifício construído depois de 1998
<b>B</b>	Edifício construído entre 1983 e 1998
<b>C</b>	Edifício construído entre 1961 e 1983
<b>D</b>	Edifício sem dimensionamento sísmico

A qualidade da construção do edifício influencia o seu comportamento sísmico. Os detalhes construtivos são fundamentais para garantir a resistência sísmica projetada para os elementos estruturais, e para tal, é necessário ter certos cuidados, assim como (Bhatt, 2007):

- Alinhamentos de armadura, espaçamento bem orientado das cintas ou estribos e comprimentos de amarração de armadura longitudinais;
- Garantir uma boa qualidade de betão e cuidado na aplicação em obra, garantindo assim uma boa capacidade de resistência, bem como a aderência necessária às armaduras;
- Boa cintagem, sobretudo nas extremidades das vigas e de pilares, e correta amarração de todos os elementos estruturais entre si;
- Garantir uma boa de execução das paredes de alvenaria.

Na Figura 4-6 encontram-se ilustrados alguns exemplos de má conceção na construção do edifício. Caso exista alguma deficiência dos pontos acima referidos, dever-se-á penalizar a classe previamente atribuída na Tabela 4 de acordo com os seguintes critérios:

- Se o edifício apresentar boa qualidade construtiva, a classe previamente atribuída não sofrerá alterações;
- Se o edifício apresentar uma qualidade de construção moderada, a classe previamente atribuída passará para uma classe abaixo;
- Se o edifício apresentar fraca qualidade construtiva, a classe previamente atribuída passará para duas classes abaixo.



**Figura 4-6 - Exemplos de má execução na conceção do edifício**

No caso de edifícios que se encontram parcialmente devolutos, isto é, que apresentam sinais evidentes de degradação/abandono, como no caso apresentado na Figura 4-7, deverá-se penalizar com a atribuição de uma classe abaixo. A título de exemplo, um edifício construído entre 1983 e 1998 e com uma qualidade de construção moderada ser-lhe-á atribuído uma classe C. Se este apresentar evidências de parcialmente devoluto, passará então para uma classe final de D.



**Figura 4-7 - Edifício parcialmente devoluto**

#### **Parâmetro P4: Irregularidade em planta**

Aspetos a avaliar:

- Localização excêntrica da caixa de elevador.
- A maior dimensão do edifício em planta é inferior a 4 vezes à menor dimensão do edifício em planta.
- Edifício apresenta uma configuração em planta compacta.

Este parâmetro avalia a forma e disposição em planta do sistema resistente do edifício. A regularidade em planta é um aspeto que condiciona o desempenho estrutural e consequentemente a vulnerabilidade sísmica, de tal modo que pode ser avaliada de forma expedita, recorrendo a relações geométricas baseadas em critérios de simetria de

dimensões da envolvente em planta do edifício (Vicente, 2008). De acordo com o Eurocódigo 8, para que um edifício possa ser considerado regular em planta, este deverá satisfazer as seguintes condições:

- 1) Assegurar, aproximadamente, a simetria em relação a dois eixos ortogonais, no que refere à rigidez lateral e à distribuição de massas;
- 2) Garantir uma forma compacta em planta, isto é, cada piso deve ser delimitado por uma linha poligonal convexa (no que respeita à forma estrutural em planta definida pelos vários elementos verticais não contando, portanto, por exemplo, com varandas em consola, caso estas existam), sendo que, caso existam reentrâncias ou bordos recuados, estas não deverão afetar a rigidez do piso em planta e a área entre a linha exterior do piso e a linha poligonal convexa não deverá exceder em 5% da área do piso;
- 3) Garantir que a rigidez dos pisos no plano seja suficientemente grande em relação à rigidez lateral dos elementos estruturais verticais, para que a deformação do piso tenha um efeito reduzido na distribuição das forças entre os elementos;
- 4) A esbelteza do edifício,  $\lambda$ , em planta deverá respeitar a seguinte condição:

$$\lambda = \frac{L_{max}}{L_{min}} \leq 4$$

Com:

- $L_{max}$  – Maior dimensão em planta do edifício;
  - $L_{min}$  – Menor dimensão em planta do edifício;
- (medidas nas direções ortogonais)

Quando um edifício tem uma caixa de elevador ou núcleo de escadas, no primeiro nível de avaliação pretende-se saber se está localizado no centro do edifício. Isso contribui para um melhor comportamento, pois são elementos de elevada rigidez, essenciais e condicionantes, para a resistência global do edifício a ações horizontais (Santos, 2011). Na atribuição de uma classe de vulnerabilidade a este parâmetro, começa-se pela atribuição da classe inicial A e posteriormente analisa-se se o edifício tem ou não as seguintes fontes de irregularidade em planta:

- Localização excêntrica da caixa de elevador;
- Maior dimensão do edifício em planta superior a 4 vezes a menor dimensão do edifício em planta;
- Configuração em planta não compacta.

Cada uma destas fontes de irregularidade vai servir como penalizador da classe inicial, isto é, a falha de uma delas levará a que a classe diminua um nível, como demonstrado na Tabela 4-6:

**Tabela 4-6 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P4**

Classe	Identificação do nº de irregularidades geométricas no edifício
<b>A</b>	Edifício sem qualquer irregularidade
<b>B</b>	Edifício com uma fonte de irregularidade
<b>C</b>	Edifício com duas fontes de irregularidades
<b>D</b>	Edifício com três fontes de irregularidades

#### **Parâmetro P5: Irregularidade em altura**

Aspetos a avaliar:

- Presença de recuos.
- Descontinuidade do caminho de carga.
- Altura diferente entre pisos.

O seguinte parâmetro faz uma avaliação da variação de massa ou da área entre pisos consecutivos, propondo-se ainda uma forma de análise mais rigorosa, recorrendo à avaliação da variação da rigidez em altura. Os edifícios que apresentam uma estrutura em pórtico ao nível do rés-do-chão introduzem uma irregularidade estrutural em relação aos pisos superiores. Esta diferença de rigidez e resistência é avaliada também de forma simplificada pelo critério da variação de área entre pisos consecutivos. Pelo Eurocodigo 8, um edifício é regular em altura desde que sejam cumpridos os seguintes critérios:

1. O seu sistema de resistência lateral deverá ser contínuo, desde as fundações até ao topo do edifício, como exemplificado na Figura 4-8;



Figura 4-8 – Supressão de elementos resistentes

2. A massa e a rigidez lateral de cada piso deverão ser constantes ou decrescerem gradualmente, sem variações abruptas, desde a base até ao topo do edifício;
3. Nos edifícios em pórtico, não deverá haver uma variação abrupta entre pisos adjacentes relativamente à resistência exigida pela análise;
4. Caso ocorram recuos, será necessário verificar as seguintes disposições:
  - Se ocorrerem recuos graduais da fachada em altura, preservando a simetria axial da estrutura em qualquer piso, o recuo não deverá exceder em 20% a dimensão relativa à direção do recuo, do piso anterior, como demonstrado na Figura 4-9.

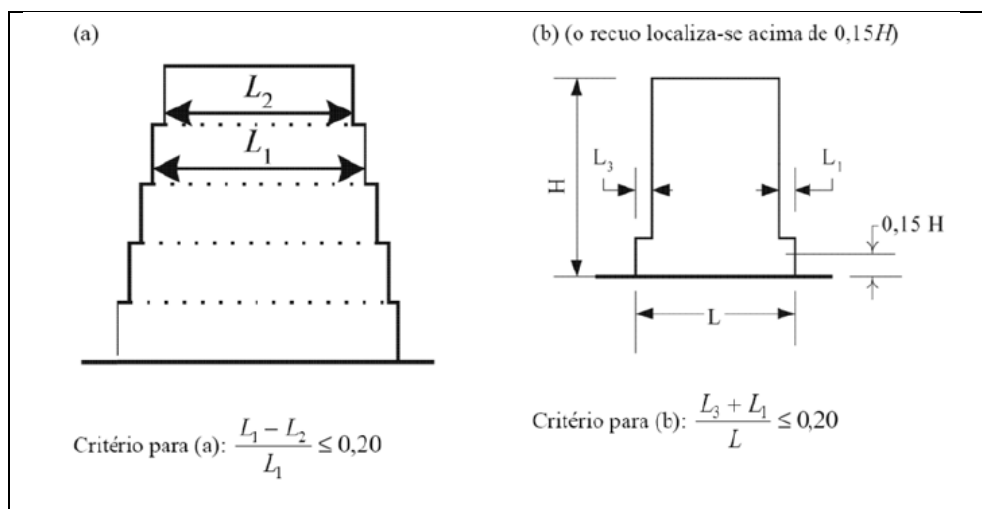


Figura 4-9 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo a) e b). Fonte: (CEN, 2004)



- A estrutura poderá ainda ser regular em altura mesmo que ocorra um recuo maior que os supracitados 20%, desde que este seja inferior a 50% da dimensão paralela na base do edifício e esteja situado nos 15% inferiores da altura total do edifício (acima do nível de aplicação da ação sísmica), assegurando-se igualmente que a simetria é mantida. Note-se que, neste caso, será necessário que a estrutura, na zona de projeção vertical da parte superior do edifício acima do recuo, seja capaz de resistir a pelo menos 75% da força de corte horizontal que apareceria entre pisos, num edifício idêntico, mas sem o alargamento da base, como demonstrado na Figura 4-10.

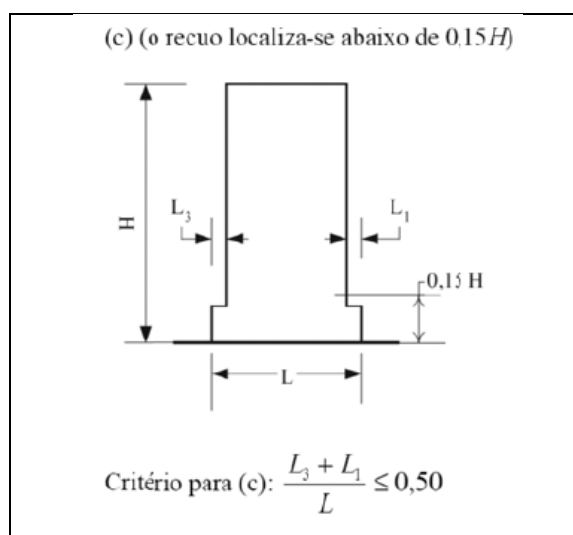


Figura 4-10 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo c). Fonte: (CEN, 2004)

- Caso ocorram recuos que não preservem a simetria, a soma dos recuos em todos os pisos não deverá ser maior do que 30% da dimensão em planta do primeiro piso, sendo que em cada piso o recuo que surja não poderá exceder 10% da dimensão do piso anterior como demonstrado na Figura 4-11.

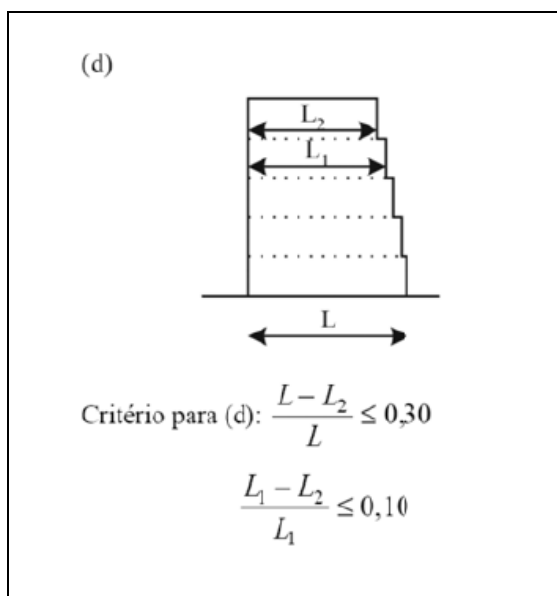


Figura 4-11 - Critérios de regularidades dos edifícios com recuos do tipo d). Fonte:(CEN, 2004)

As diferenças da altura, ou pé direito, dos andares introduzem descontinuidades na rigidez da estrutura em altura. A diminuição do pé direito em determinados andares provoca nestes, um acréscimo do esforço transverso.

Para a escolha da classe de vulnerabilidade do edifício, primeiro deve-se proceder à visualização da geometria do edifício, ou seja, avaliar se este apresenta recuos. Numa primeira avaliação, um edifício que não apresente qualquer tipo de recuo, é-lhe atribuída a classe de vulnerabilidade A. Caso apresente algum recuo, para cada tipo é atribuído uma determinada classe de vulnerabilidade, tal como indicado nas Tabela 4-7, Tabela 4-8 e Tabela 4-9.

Tabela 4-7 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo a) e b)

Classe	Geometria do edifício em altura
<b>B</b>	Edifício que apresenta um recuo em qualquer piso que varia entre 20% a 30% da dimensão em planta do nível inferior na direção do recuo. Edifício com uma torre de altura inferior a 10% da altura total do edifício.
<b>C</b>	Edifício que apresenta um recuo em qualquer piso que varia entre 30% a 40% da dimensão em planta do nível inferior na direção do recuo. Edifício com uma torre de altura superior a 10% e inferior a 40% da altura total do edifício.
<b>D</b>	Edifício que apresenta um recuo em qualquer piso superior a 40% da dimensão em planta do nível inferior na direção do recuo. Edifício com uma torre de altura igual ou superior a 40% da altura total do edifício.

**Tabela 4-8 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo c)**

<b>Classe</b>	<b>Geometria do edifício em altura</b>
<b>B</b>	Edifício que apresenta um único recuo localizado nos 15% inferiores da altura total do sistema estrutural principal, o recuo varia entre os 50% e inferior a 60% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura inferior a 10% da altura total do edifício.
<b>C</b>	Edifício que apresenta um único recuo localizado nos 15% inferiores da altura total do sistema estrutural principal, o recuo varia entre os 60% e inferior a 70% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura superior a 10% e inferior a 40% da altura total do edifício.
<b>D</b>	Edifício que apresenta um único recuo localizado nos 15% inferiores da altura total do sistema estrutural principal, o recuo é superior a 70% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura igual ou superior 40% da altura total do edifício.

**Tabela 4-9 - Definição das classes de vulnerabilidade para o recuo d)**

<b>Classe</b>	<b>Geometria do edifício em altura</b>
<b>B</b>	Edifício que apresenta recuos não simétricos, em cada lado, dos recuos de todos os pisos varia entre 30% a 40% da dimensão em planta ao nível do piso acima da fundação ou acima do nível superior de cava rígida, e cada recuo não deve ser superior a 10% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura inferior a 10% da altura total do edifício.
<b>C</b>	Edifício que apresenta recuos não simétricos, em cada lado, dos recuos de todos os pisos varia entre 40% a 50% da dimensão em planta ao nível do piso acima da fundação ou acima do nível superior de cava rígida, e cada recuo não deve ser superior a 10% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura superior a 10% e inferior a 40% da altura total do edifício.
<b>D</b>	Edifício que apresenta recuos não simétricos, em cada lado, dos recuos de todos os pisos superior a 50% da dimensão em planta ao nível do piso acima da fundação ou acima do nível superior de cava rígida, e cada recuo não deve ser superior a 10% da dimensão em planta do nível inferior. Edifício com uma torre de altura superior a 40% da altura total do edifício.

A existência de pisos comerciais no rés-do-chão dos edifícios, ou de pisos técnicos, lojas, escritórios em pisos superiores pode introduzir alterações significativas das secções dos elementos resistentes de andar para andar como mostra a Figura 4-12. As descontinuidades

das secções de elementos estruturais como paredes resistentes e pilares introduzem descontinuidades na resposta e agravam os esforços nas zonas de transição. As alterações da altura do pé direito dos andares introduzem descontinuidades na rigidez da estrutura em altura. De forma a penalizar a classe previamente atribuída, se o edifício em análise apresentar alguma destas situações, dever-se-á escolher uma classe de vulnerabilidade acima, até ao máximo de duas penalizações (H. Rodrigues, 2005).



Figura 4-12 - Alturas diferentes entre o piso do r/chão e os pisos e vazamento do piso térreo devido ao comércio.

#### Parâmetro P6: Existência de mecanismo de *soft-storey*

Aspetos a avaliar:

- Edifício com possível formação de mecanismo tipo *soft-storey*.

O mecanismo *soft-storey* está associado a uma irregularidade de rigidez ou resistência em altura, e em muitos casos introduzida pela descontinuidade dos painéis de alvenaria em altura. Este mecanismo ocorre geralmente no piso do rés-do-chão por questões arquitetónicas ou para espaços reservados para função comercial. Este tipo de estruturas apresenta o seu piso térreo muito fraco e flexível do que os restantes pisos superiores, concentrando naquele as deformações devido à ação sísmica (Romãozinho, 2008). Os pilares do rés-do-chão ficam sujeitos a grandes deslocamentos horizontais entre as suas

extremidades, com efeitos de segunda ordem consideráveis que ditam muitas vezes a sua rotura e o consequente colapso dos edifícios. Na Figura 4-13 apresenta-se um edifício colapsado devido à inexistência de paredes de alvenaria por causa das garagens levando á descontinuidade de rigidez em altura (Marques, 2012). A classificação proposta para este parâmetro, o qual apresenta apenas com 2 classes de vulnerabilidade, encontra-se sintetizado na Tabela 4-10.



Figura 4-13 – Presença de *soft-storey*

Tabela 4-10 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P6

Classe	Identificação de mecanismo <i>soft-storey</i>
A	Edifício sem mecanismo <i>soft-storey</i>
D	Edifício com mecanismo <i>soft-storey</i>

### Parâmetro P7: Presença de pilares curtos

Aspetos a avaliar:

- Sem mecanismo tipo Pilar curto.
- Possível mecanismo tipo Pilar curto no piso superior do edifício.
- Possível mecanismo tipo Pilar curto na base do edifício.

O aparecimento e /ou desaparecimento súbito de elementos considerados não resistentes, como caso das paredes de alvenaria, ou de elementos resistentes não considerados diretamente no estudo do comportamento sísmico do edifício mesmo quando os andares apresentem o mesmo pé direito, a existência de paredes de alvenaria que não preenchem a totalidade da altura do pilar origina o mecanismo pilar curto (*short column*). Esta condição conduz ao aumento da suscetibilidade ao corte, durante a ocorrência de um sismo severo. A parede de alvenaria restringe a deformação lateral da parte inferior dos pilares, o que faz diminuir a altura útil disponível para estes absorverem a diferença de deslocamento horizontal entre pisos e leva a uma grande concentração de esforços de corte nestas zonas, como é demonstrado na Figura 4-14 (Bhatt, 2007; Lopes, 2008).



Figura 4-14 - Pilares curtos na base do edifício (Lorca, Espanha)

Para este parâmetro, a classificação proposta apresenta-se pela Tabela 4-11.

**Tabela 4-11 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P7**

<b>Classe</b>	<b>Identificação de pilares curtos</b>
<b>A</b>	Edifício que não apresente pilares curtos
<b>B</b>	Edifício que apresente pilares curtos num dos seus pisos superiores.
<b>C</b>	Edifício que apresente pilares curtos em vários pisos ou um edifício que apresente um pilares curtos na base do edifício
<b>D</b>	Edifício apresente mais que um pilar curto em pisos semi-enterrados capazes de criar um mecanismo de piso

### **Parâmetro P8: Outros elementos**

Aspetos a avaliar:

- Platibandas.
- Avançados.

Este parâmetro avalia os efeitos dos elementos não estruturais dos edifícios, tal como as platibandas, avançados e varandas que, em caso de colapso, podem pôr as pessoas em risco ou agravar o nível de dano nos elementos estruturais (CEN, 2004). A definição das classes de vulnerabilidade associadas a este parâmetro está expressa na Tabela 4-12.

**Tabela 4-12 - Definição das classes de vulnerabilidade para o parâmetro P8.**

<b>Classe</b>	<b>Identificação de elementos não estruturais no edifício</b>
<b>A</b>	Edifício sem elementos não estruturais vulneráveis.
<b>B</b>	Edifício com platibandas na cobertura e/ou nas varandas.
<b>C</b>	Edifício com avançados.
<b>D</b>	Edifício com avançados e platibandas na cobertura e/ou nas varandas .

#### 4.4 Grau de confiança – Classificação EMBA

Uma vez que existe um nível de incerteza associado à escolha da classe de vulnerabilidade de cada parâmetro na definição do  $I_v$  como consequência do modo como foram efetuadas as inspeções, pelo facto de não se conseguir visualizar nitidamente determinados elementos, foi estabelecido uma classificação para um grau de confiança, com o intuito de associar a cada parâmetro avaliado uma medida da fiabilidade da escolha efetuada para a classe de vulnerabilidade. A Tabela 4-13 apresenta quatro níveis para o grau de confiança da classificação do parâmetro (E-M-B-A), cuja sigla corresponde à primeira letra de 4 graus de confiança, que permite distinguir o rigor presente na classificação dos vários parâmetros (Vicente, 2008). De seguida são apresentadas as tabelas referentes a cada parâmetro e a designação de cada grau de confiança de forma a ter um melhor apoio na decisão a tomar quando for analisado o edifício.

Tabela 4-13 - Grau de confiança da classificação da vulnerabilidade sísmica

Grau de confiança	Informação
<b>E</b> (elevado)	Informação de origem direta, ou seja, através de observação e medições "in situ", implicando um conhecimento preciso da geometria, materiais e soluções construtivas do edifício. Inclui consulta de informação escrita e peças desenhadas do projeto. Informação com um grau de confiança próximo do exato.
<b>M</b> (médio)	Informação apoiada na avaliação indireta por meio de: visualização de fotografias, consulta de informação direta de situações análogas bem documentadas e quantificadas, consulta de bibliografia da especialidade, conhecimento de opiniões técnicas e de informação oral credível.
<b>B</b> (baixo)	Impossibilidade de observação direta. Informação baseada em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos comuns de projeto e execução, no que respeita à época e regionalidade da construção, ou baseada em informação oral não consensual. Estimativas resultantes de observação visual.
<b>A</b> (ausente)	Informação adoptada com um grau de incerteza próximo do da escolha casual. A atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa.



Tabela 4-14 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P1

Parâmetro	Grau de confiança	Informação
<b>P1 – Implantação do edifício</b>	E	Informação de origem direta, isto é, através da observação visual in-situ por meio de prospecções locais para avaliar o tipo de terreno, a sua consistência, (abertura de valas de inspeção para sondagens com ou sem extração para avaliar o solo subjacente à fundação, consulta de cartas geológicas, etc.), ou ainda, pela consulta do projeto (se existente) das suas peças desenhadas, pormenores e informação escrita referente às soluções. Informação com um grau de confiança próximo do exato.
	M	Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias, consulta de informação acerca das condições do terreno, medição do declive dos arruamentos e ainda de informação oral credível.
	B	Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época.
	A	Informação adoptada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa.

Tabela 4-15 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P2

Parâmetro	Grau de confiança	Informação
<b>P2 – Contexto urbano</b>	E	Informação de origem direta, isto é, através da observação visual pelo exterior do edifício.
	M	Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias e ainda de informação oral credível.
	B	Baseada em informação oral, em que não é possível visitar o local.
	A	Informação adoptada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa.

Tabela 4-16 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P3

Parâmetro	Grau de confiança	Informação
<b>P3 – Idade do edifício</b>	E	Informação de origem direta, isto é, através da consulta de um registo ou projeto de com a referente data de construção (se existente). Informação com um grau de confiança próxima do exato.
	M	Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias, consulta de informação direta de construções semelhantes na vizinhança, conhecimento e recolha de opiniões técnicas e ainda de informação oral credível.
	B	Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época.
	A	Informação adoptada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa.

Tabela 4-17 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P4

Parâmetro	Grau de confiança	Informação
<b>P4 – Irregularidade em planta</b>	E	Informação de origem direta, isto é, através de medição <i>in-situ</i> ou ainda pela consulta de um registo geométrico à escala pós-construção (se existente) ou informação escrita referente à geometria. Informação necessária ao rigoroso cálculo das excentricidades em planta
	M	Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias e elementos sem escala e ainda de informação oral credível.
	B	Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época.
	A	Informação adoptada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa.

Tabela 4-18 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P5

Parâmetro	Grau de confiança	Informação
<b>P5 – Irregularidade em altura</b>	E	Informação de origem direta, se for possível a identificação de todas as soluções construtivas através da observação visual, consulta de um registo geométrico rigoroso (se existente) das suas peças desenhadas, pormenores e informação escrita referente a tipologia e constituição das soluções. Informação necessária ao rigoroso cálculo.
	M	Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias e elementos sem escala e ainda de informação oral credível.
	B	Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época.
	A	Informação adoptada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa.

Tabela 4-19 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P6

Parâmetro	Grau de confiança	Informação
<b>P6 - Existência de Mecanismo de Soft-storey</b>	E	Informação de origem direta, isto é, através da observação visual <i>in-situ</i> ou ainda pela consulta do projeto (se existente) das suas peças desenhadas. Informação com um grau de confiança próxima do exato.
	M	Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias, consulta de informação direta de construções com elementos não-estruturais semelhantes na vizinhança, conhecimento e recolha de opiniões técnicas e ainda de informação oral credível.
	B	Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época.
	A	Informação adoptada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa.

Tabela 4-20 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P7

Parâmetro	Grau de confiança	Informação
<b>P7 - Presença de Pilares Curtos</b>	E	Informação de origem direta, isto é, através da observação visual in-situ ou ainda pela consulta do projeto (se existente) das suas peças desenhadas. Informação com um grau de confiança próxima do exato.
	M	Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias, consulta de informação direta de construções com elementos não-estruturais semelhantes na vizinhança, conhecimento e recolha de opiniões técnicas e ainda de informação oral credível.
	B	Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época.
	A	Informação adoptada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa.

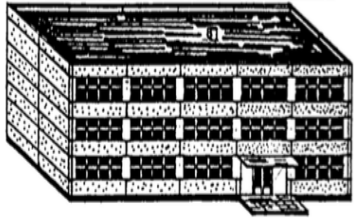
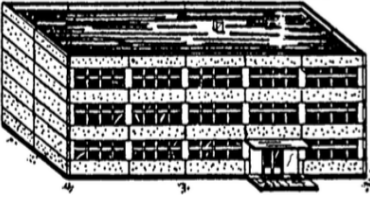
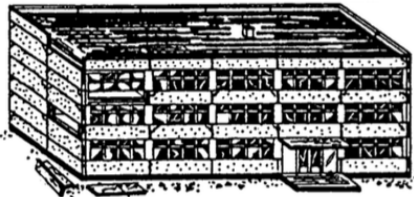
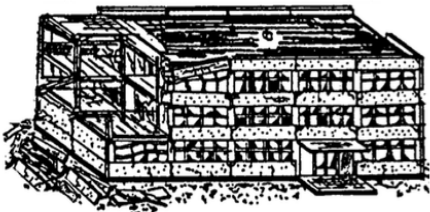

Tabela 4-21 - Descrição dos níveis de confiança para o parâmetro P8

Parâmetro	Grau de confiança	Informação
<b>P8 – Outros elementos</b>	E	Informação de origem direta, isto é, através da observação visual in-situ por meio de prospecção localizada e desmontagem local ou ainda pela consulta do projeto (se existente) das suas peças desenhadas, pormenores e informação escrita referente aos elementos não estruturais.
	M	Informação predominantemente deduzida, através da consulta de fotografias, consulta de informação direta de construções com elementos não-estruturais semelhantes na vizinhança, conhecimento e recolha de opiniões técnicas e ainda de informação oral credível.
	B	Informação presumida em hipóteses cognitivas razoáveis de procedimentos usuais e comuns de execução à época.
	A	Informação adoptada com um grau de certeza limiar, de escolha casual. Neste caso, a atribuição da classe do parâmetro é puramente indicativa.

## 4.5 Classificação de danos de edifícios em betão armado

O modo como um edifício se comporta perante um abalo sísmico depende da sua tipologia construtiva como diferentes graus de danos podem ser observados para os edifícios de betão armado. Como se pode verificar na Tabela-4-22, quando um edifício apresenta danos leves é de classificação D1, enquanto o colapso já é classificado como D5.

Tabela-4-22 - Classificação de danos de edifícios em betão armado. Fonte: (Grünthal, 1998)

Grau de Dano (D)	
	<p><b>D1 – Danos negligenciáveis a leves</b></p> <p>Não há danos estruturais. Danos não estruturais ligeiros. Presença de algumas fissuras. Queda de estuques.</p>
	<p><b>D2 – Danos moderados</b></p> <p>Danos estruturais ligeiros. Danos não estruturais moderados. Presença de fendas em colunas, molduras e paredes estruturais. Fendas em paredes divisórias. Queda de estuques.</p>
	<p><b>D3 – Danos severos</b></p> <p>Danos estruturais moderados. Danos não estruturais graves. Presença de fendas em colunas, juntas, etc. Descasque do recobrimento de betão, encurvadura das armaduras comprimidas. Grandes fissuras em paredes divisórias.</p>
	<p><b>D4 – Danos muito graves</b></p> <p>Danos estruturais graves. Danos não estruturais muito graves. Grandes aberturas nos elementos estruturais. Inclinação de colunas e/ou colapso de algumas colunas ou de um piso superior.</p>
	<p><b>D5 – Colapso</b></p> <p>Destruição Colapso total ou parcial da estrutura.</p>

#### **4.6 Comentários finais**

A metodologia proposta para a avaliação da vulnerabilidade sísmica assenta na junção de uma metodologia tipológica com uma convencional, baseada na observação de danos, com uma componente estatística que a torna interessante como metodologia de primeiro nível. Conhecendo a sua aplicabilidade, torna-se útil para a análise de regiões ou grandes áreas. Esta metodologia identificar 8 parâmetros fundamentais que regem o comportamento e a resposta sísmica dos edifícios, permitindo desta forma identificar fragilidades e problemas estruturais recorrentes em estruturas de betão armado.

A maior fonte de incerteza encontra-se na definição e atribuição dos pesos aos parâmetros, incerteza essa que, apesar de não ter sido tratada matematicamente, foi objeto de uma análise de sensibilidade. Os parâmetros foram então agrupados por grau de importância, de forma a facilitar a relativização entre os pesos atribuídos a cada um dos parâmetros definidos.

Ao longo do Capítulo 5 será aplicada a metodologia a edifícios de diferentes características e localizações, sendo ainda apresentados os resultados da sua aplicação. Para este efeito, será utilizado um vasto conjunto de informação de dano pós-sismo.

## **CAPÍTULO 5**

---

### **EXPOSIÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**





## **Capítulo 5. Exposição e discussão dos resultados**

### **5.1 Enquadramento**

O procedimento da metodologia de análise da vulnerabilidade sísmica foi aplicado a 91 edifícios de betão armado danificados na sequência de sismos fortes nas últimas quatro décadas, nomeadamente no Japão, China, Itália, Peru, Espanha, Turquia, Estados Unidos da América, Haiti, Nova Zelândia, Indonésia, Índia e México. Para a análise destes edifícios, foram utilizados registos fotográficos de relatórios de visitas técnicas de instituições e especialistas, que se deslocaram às zonas afetadas, produzindo “post-seismic reports”, que são amplamente divulgados pela comunidade científica e técnica. Algumas conseguiram ter acesso a outros tipos de registo, como o projeto de solução estrutural, materiais usados e características do solo, em que todos esses aspetos importantes serviram para maior fiabilidade dos resultados obtidos.

No presente capítulo são apresentadas, inicialmente, para cada um dos oito parâmetros que compõem metodologia, as classificações obtidas para o universo total dos edifícios avaliados. A exposição é concluída com a indicação e justificação dos pressupostos tidos em conta na classificação e com a discussão dos resultados obtidos. A classificação dos parâmetros também permitiu o cálculo de um índice de vulnerabilidade para cada edifício analisado, a partir da soma ponderada das pontuações obtidas. Foi também elaborada a análise dos graus de confiança para cada parâmetro, tendo em conta o tipo e a fiabilidade/rigor da informação.

Após a análise do índice de vulnerabilidade para os edifícios de betão armado, interessou também estimar o grau de dano para cada um deles, sendo que, o grau de dano médio foi obtido a partir da média dos graus de danos atribuídos por um conjunto de investigadores que colaboraram no estudo, de forma a esse valor de dano ser mais fiável. Por fim, procedeu-se ao desenvolvimento da expressão analítica de dano, permitindo assim fazer estimativa de dano nos edifícios de betão armado.

Toda a informação está apresentada no Anexo II onde estão todos os edifícios analisados com os respetivos graus de dano médio, a intensidade, a classificação EMBA e o índice de vulnerabilidade de que cada edifício.

## 5.2 Classificação dos parâmetros

### 5.2.1 Parâmetro P1 – Implantação do Edifício

A análise deste parâmetro envolve o conhecimento relativo do tipo de solo em que o edifício se localiza. A falta de informação acerca do tipo de solo existente nas regiões em estudo, obrigou a que a atribuição das classes fosse modificada, isto é, não havendo informação do solo, optou-se por considerar um solo B como valor médio para este parâmetro, dado ser desconhecido. Depois, com a presença de situações modificadoras, como por exemplo, a inclinação do solo, a classe de vulnerabilidade aumenta. Como os tipos de solo B e C estão associados à classe de vulnerabilidade B, é de esperar que esta seja a classe dominante para este parâmetro. Após a análise dos resultados obtidos pelas fichas de inspeção, a classe de vulnerabilidade B foi atribuída em 81 dos 91 edifícios analisados (em cerca de 89% dos casos). Os casos das classes de vulnerabilidade C e D, são referentes àqueles em que o edifício estava em zona com moderada/elevada inclinação, ou zonas de aterro ou vale. Estas classes atribuídas a poucos casos, pois só a partir do registo fotográfico, por vezes, não era suficiente para identificar se o edifício se encontra edificado sobre um solo inclinado, ou em zona de aterro. Os resultados da classificação deste parâmetro encontram-se expostos na Figura 5-1.

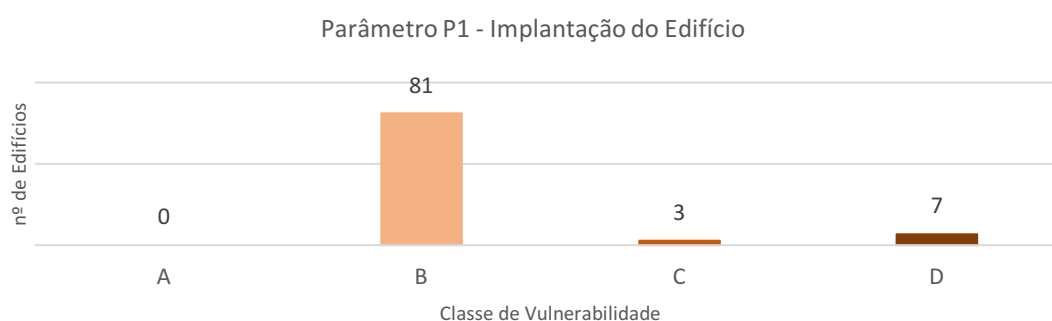


Figura 5-1 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P1

### 5.2.2 Parâmetro P2 – Posição no quarteirão

A análise deste parâmetro envolve o conhecimento relativo ao quarteirão onde o edifício está inserido. A Figura 5-2 ilustra os resultados da classificação do presente parâmetro. Como se pode observar, a classe de vulnerabilidade B é a que foi atribuída à maioria dos edifícios, enquanto que as classes de vulnerabilidade A, C e D nesta amostra tiveram a mesma expressão. O destaque na classificação da classe de vulnerabilidade B sucede devido à disposição dos edifícios, em agregados. Sendo que a maior parte dos edifícios analisados são edifícios de “banda meio”, a interação entre os edifícios adjacentes penaliza a classe de vulnerabilidade inicial que lhe é atribuída, e por essa razão, a classe de vulnerabilidade B apresenta uma discrepância acentuada em relação às restantes classes.

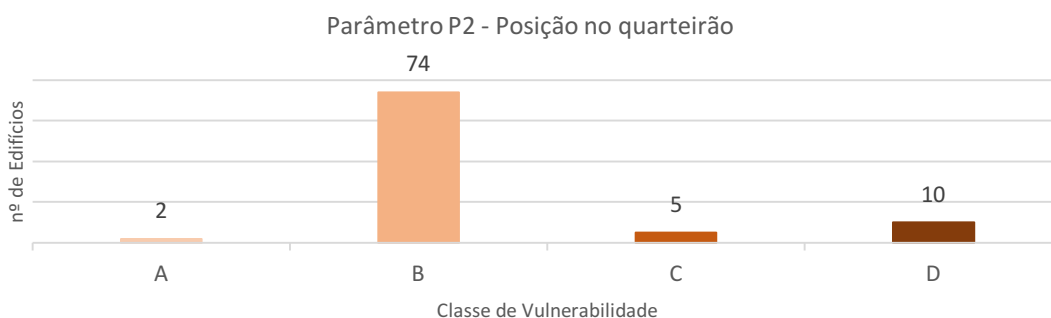


Figura 5-2 - Distribuição dos edifícios pelas classes de vulnerabilidade do parâmetro P2

### 5.2.3 Parâmetro P3 – Idade do edifício

A análise deste parâmetro envolve o conhecimento relativo ao período em que o edifício foi construído, e implicitamente à qualidade da sua construção. Mais uma vez, a falta de informação acerca da data/época em que o edifício foi construído, assumiu-se que a atribuição das classes fosse modificada, isto é, caso não houvesse informação sobre a data de construção, sugeria-se que o edifício fosse classificado como tendo sido construído entre 1983 e 1998, uma vez que nesse período os edifícios já seriam projetados segundo o regulamento de segurança e ações para estruturas de edifícios e pontes (RSA) e pelo regulamento de estruturais de betão armado e pré-esforçado (REBAP), em que já são quantificadas as ações sísmicas no projeto dos edifícios, tornando-se assim não

beneficiador, nem prejudicante da classe, em caso de dúvida. A esse período (1983-1998) é atribuído a classe de vulnerabilidade B.

No entanto, como a qualidade da construção dos edifícios identificados era, maioritariamente medíocre, fazia com que a classe fosse penalizada e lhe fosse atribuída a classe de vulnerabilidade C. A Figura 5-3 ilustra os resultados da classificação do presente parâmetro e, como se pode verificar, a classe de vulnerabilidade C foi a mais expressiva, 54 em 91 edifícios, e como se esperaria a classe de vulnerabilidade A não apresenta qualquer edifício.

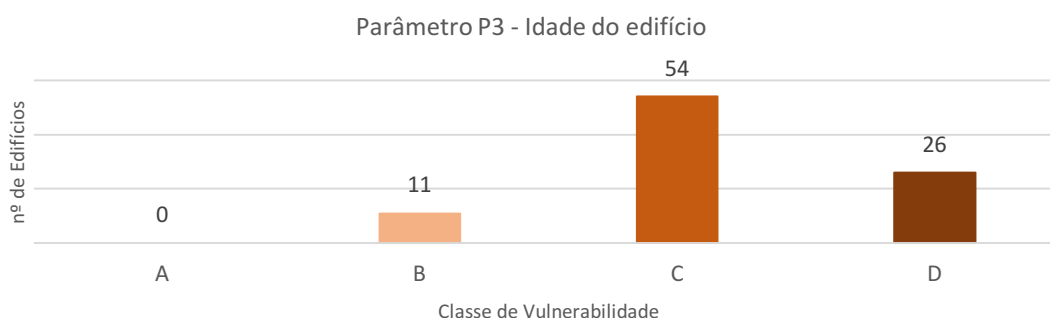


Figura 5-3 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P3

#### 5.2.4 Parâmetro P4 – Irregularidade em planta

A análise deste parâmetro envolveu o uso de critérios de excentricidade e de critérios geométricos. Os edifícios analisados são maioritariamente regulares logo era expectável que as classes de vulnerabilidade predominantes fossem as classes de vulnerabilidade A ou B. Os resultados obtidos pela classificação do parâmetro podem ser visualizados na Figura 5-4. Através da análise dessa Figura 5-4, é de referir uma grande discrepância entre a classe de vulnerabilidade A e B porque, apesar de ter sido analisado um conjunto alargado de fotografias onde as informações dos relatórios, muitas vezes não era suficiente para poder fazer uma análise mais assertiva do edifício, nomeadamente em relação à localização, excêntrica ou não, da caixa de elevador. Neste caso em particular, seriam necessárias fotografias mais reveladoras da entrada do edifício para retirar qualquer dúvida sobre o posicionamento da caixa de elevador.

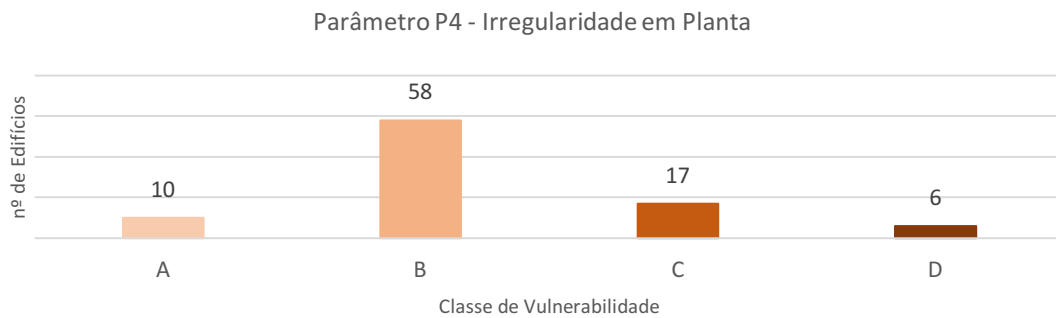


Figura 5-4 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P4

### 5.2.5 Parâmetro P5 – Irregularidade em altura

Os resultados da classificação deste parâmetro estão expostos na Figura 5-5. É possível constatar que a maioria dos edifícios analisados são de classe de vulnerabilidade B e C. O motivo pelo qual existem poucos edifícios avaliados com classe de vulnerabilidade A prende-se com a existência de espaços comerciais ou garagens no piso térreo dos edifícios, sendo a altura entre esse piso e os pisos superiores diferente. Apenas 3 edifícios foram avaliados com a classe de vulnerabilidade D, sendo estes os que apresentaram algum tipo de recuo, e outros 4 edifícios foram avaliados com classe de vulnerabilidade A, apresentando regularidade em altura.

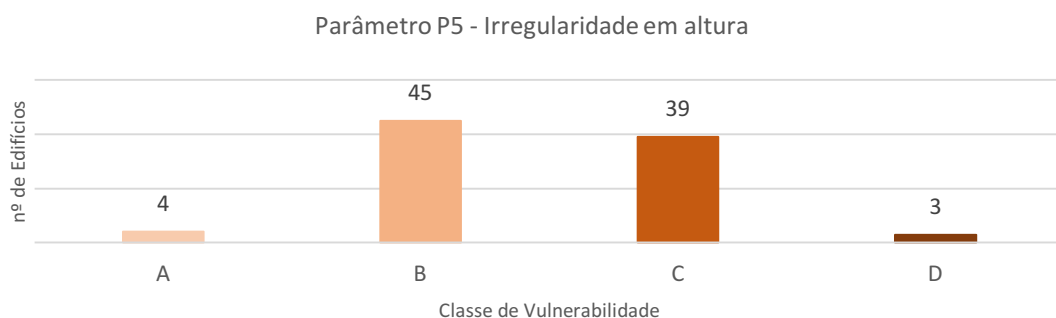


Figura 5-5 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P5

### 5.2.6 Parâmetro P6 – Existência de mecanismo de *soft-storey*

A Figura 5-6 ilustra os resultados obtidos após a classificação dos 91 edifícios inspecionados relativamente à presença de mecanismo *soft-storey*. Como se pode analisar pela Figura 5-6, apenas se classificou em classes de vulnerabilidade A e D, isto porque, a classificação é binária, pois o edifício ou apresenta, ou não apresenta, grande suscetibilidade a este mecanismo. A classe de vulnerabilidade D foi atribuído ao maior número de edifícios, porque os edifícios analisados apresentaram pisos vazados com grandes aberturas ao nível do rés-do-chão, devido aos espaços com funções comerciais, ou apenas por uma questão estética.

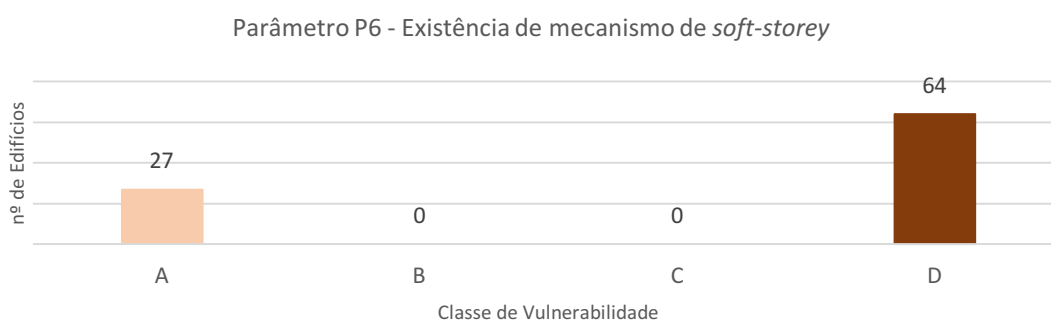


Figura 5-6 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P6

### 5.2.7 Parâmetro P7 – Presença de pilares curtos

Os resultados da classificação deste parâmetro estão expostos na Figura 5-7. É possível constatar que a maioria dos edifícios analisados, 63 dos 91 edifícios, não possui pilares curtos na estrutura, sendo estes classificados com classe de vulnerabilidade A. É de realçar que não houve edifícios classificados com a classe de vulnerabilidade B, isto porque os edifícios analisados não apresentavam pilares curtos nos pisos superiores. Muitos desses pilares curtos encontravam-se no piso térreo ou enterrados, devido às janelas ou entradas de ar para as garagens.

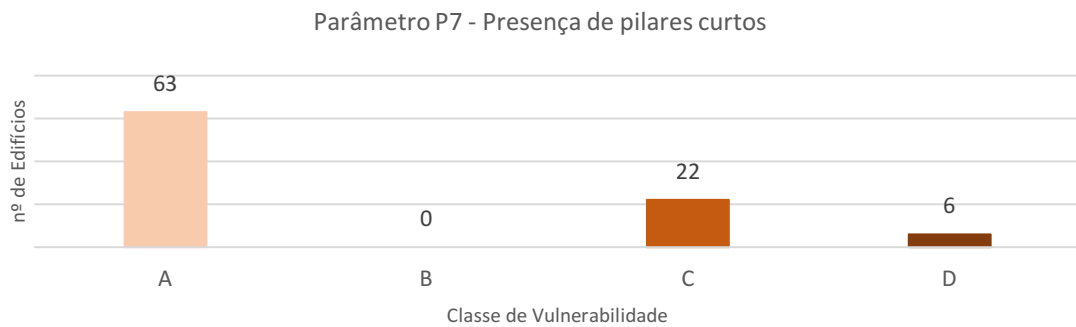


Figura 5-7 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P7

### 5.2.8 Parâmetro P8 – Outros elementos

A Figura 5-8 ilustra os resultados obtidos após a classificação dos 91 edifícios inspecionados relativamente à existência de elementos não estruturais com risco de queda e dano. A maioria dos edifícios isto devido à não existência de elementos não estruturais com risco de dano ou queda, classe de vulnerabilidade A, ou de apresentarem apenas platibandas, classe de vulnerabilidade B. É de salientar que apenas 8 dos 91 edifícios foi atribuído a classe mais desfavorável, classe de vulnerabilidade D, devido à existência de platibandas e avançados.

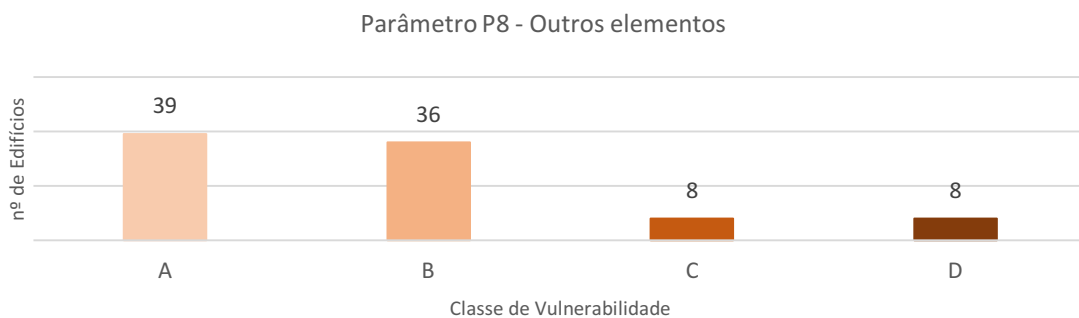


Figura 5-8 - Distribuição dos edifícios por classes de vulnerabilidade do parâmetro P8

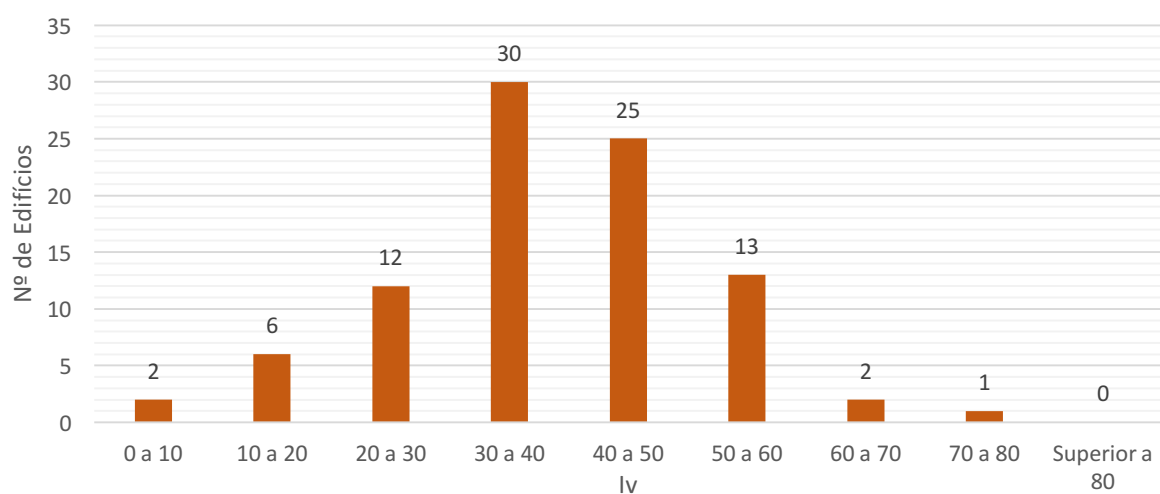
### 5.2.9 Índices de vulnerabilidade

A classificação dos 8 parâmetros da metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica permitiu calcular um índice de vulnerabilidade para cada edifício analisado, a partir de uma soma ponderada normalizada das pontuações, referentes às classes de vulnerabilidade atribuídas a cada parâmetro. Como foi exposto na Seção 4.3, o valor do índice de vulnerabilidade,  $I_v^*$ , varia entre 0 e 500 e por uma questão de interpretação, é comum usar-se o valor do índice de vulnerabilidade normalizado,  $I_v$ , em que os valores variam entre 0 e 100. Na Tabela 5-1 apresenta o valor médio e desvio padrão do índice de vulnerabilidade obtidos para todos os edifícios em análise.

**Tabela 5-1 - Valor médio dos índices de vulnerabilidade obtidos**

$I_{v,médio}$	Desvio padrão
38.73	12.3

A Figura 5-9 apresenta-se um histograma que associa os valores calculados dos índices de vulnerabilidade, agrupados em intervalos, com a número de edifícios analisados. Verifica-se que o intervalo entre 30 a 40 é o que apresenta o maior número de edifícios e verifica-se que cerca de 45.1% dos edifícios possui um  $I_v$  acima do valor 40, enquanto cerca de 17.6% tem um índice de vulnerabilidade acima do valor 50. O valor máximo e mínimo obtido para o  $I_v$ , foi de 75 e 7.5, respetivamente.



**Figura 5-9 - Distribuição dos edifícios analisados pelos intervalos de valores dos índices de vulnerabilidade**



### 5.2.10 Resultados das classificações

De seguida é apresentado na Figura 5-10 a distribuição das classes de vulnerabilidade dos parâmetros da metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica, pela percentagem de edifícios analisados. Após a análise da figura, é possível perceber quais os parâmetros que mais influência apresentam no cálculo do  $I_v$ . Atendendo à figura, conclui-se que o parâmetro P6, correspondente à existência de mecanismo de *Soft-storey*, possui o maior número de edifícios pertencentes à classe de vulnerabilidade D (cerca de 70% dos edifícios analisados), seguido pelo parâmetro P3 que corresponde à idade do edifício, com cerca de 28% dos edifícios analisados, enquanto que o parâmetro P7, que avalia a presença de pilares curtos detêm o maior número de edifícios pertencentes à classe de vulnerabilidade A (cerca de 69% dos edifícios analisados), ao qual se segue o parâmetro P8, referente aos outros elementos não estruturais, com 43% dos edifícios.

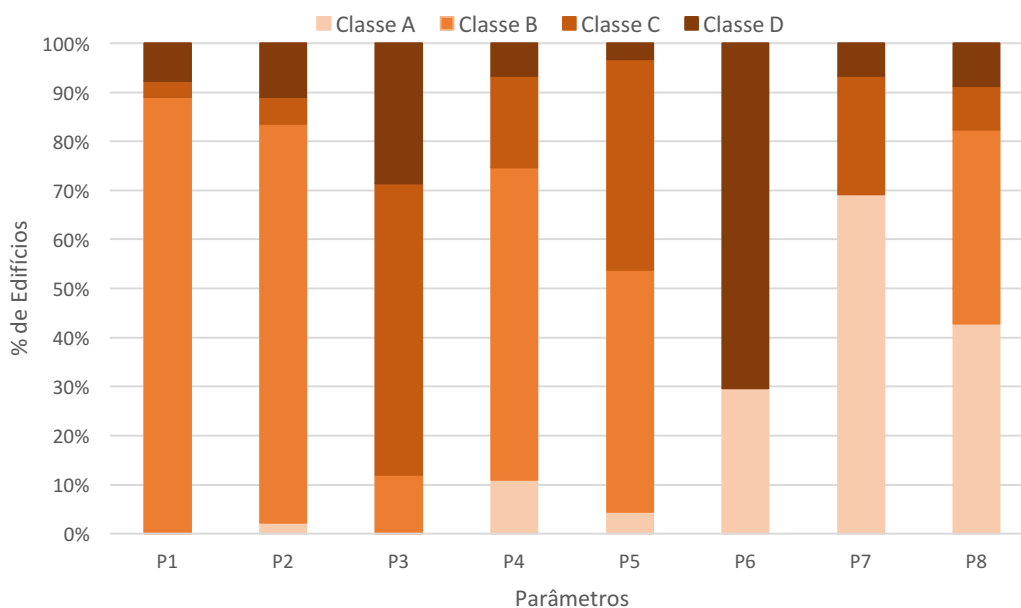


Figura 5-10 - Influência de cada parâmetro no cálculo do  $I_v$

### 5.3 Grau de confiança

A classificação de cada parâmetro na análise dos vários edifícios envolveu a associação de um grau de confiança à mesma, que traduz a confiança na classificação efetuada tendo em conta o detalhe e a fiabilidade da informação na qual se baseou. A incerteza na atribuição da classe do parâmetro é influenciada por diferentes razões, tais como, a falta de observação direta de um elemento ou solução construtiva, a ausência de informação, etc. Os graus de confiança atribuídos são: E (elevado); M (médio); B (baixo) e A (ausente). A subdivisão e a atribuição de um valor numérico aos graus de confiança proporcionaram uma definição mais pormenorizada e esclarecedora da confiança associada à classificação dos parâmetros da metodologia de análise da vulnerabilidade sísmica. A Tabela 5-2 apresenta as classes consideradas e os respetivos limites quantitativos.

**Tabela 5-2 - Graus de confiança e respetivos intervalos de quantificação**

Graus de confiança	Intervalo numérico
E	4.00
E-	3.99 – 3.75
E/M	3.74 – 3.25
M+	3.24 – 3.01
M	3.00
M-	2.99 – 2.75
M/B	2.74 – 2.35
B+	2.34 – 2.01
B	2.00
B-	1.99 – 1.75
B/A	1.74 – 1.25
A+	1.24 – 1.01
A	1.0 – 0.00

Com base nestes intervalos de quantificação, obteve-se o grau de confiança médio associado à classificação de cada parâmetro e a cada edifício no universo analisado.

Como se pode ver na Figura 5-11, o grau de confiança médio com maior representatividade é o E/M, sendo que constitui o grau de confiança médio dos parâmetros P2, P5 e P7 (posição no quarteirão, irregularidade em altura e presença de pilares). O grau de confiança que lhe segue é o E-, com dois parâmetros P6 e P8 (existência de mecanismo *soft-storey* e outros elementos estruturais). O parâmetro P1, que corresponde à implantação do edifício, apresenta o grau de confiança médio mais baixo (A+), devido à falta de informação acerca do tipo de solo existente nas regiões em estudo.

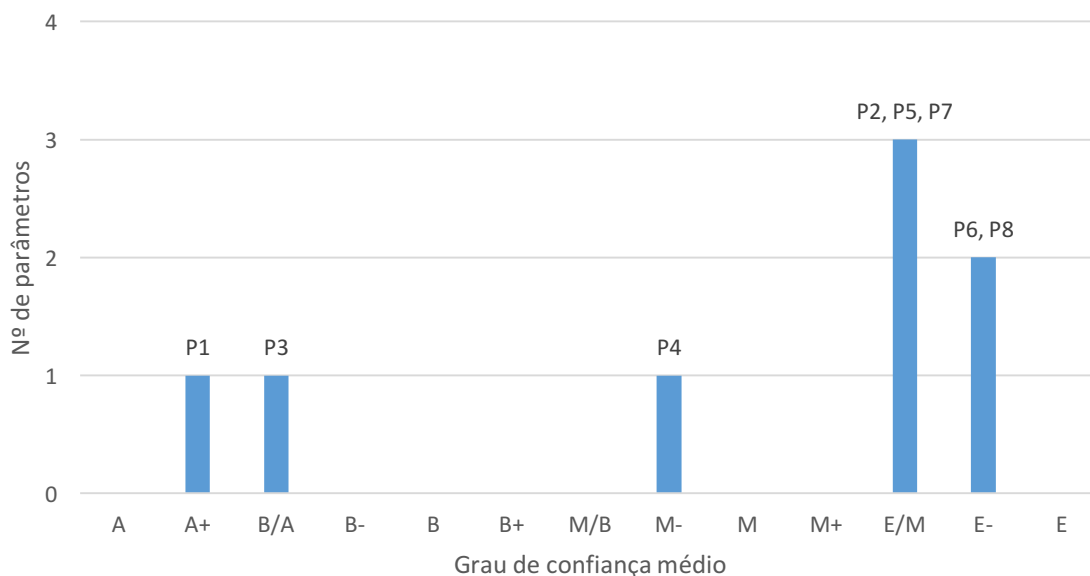


Figura 5-11 – Distribuição dos parâmetros pelo grau de confiança médio

A Figura 5-12 expõe o grau de confiança médio na classificação dos edifícios, ou seja, corresponde à média do grau de confiança atribuído em cada parâmetro na classificação de um determinado edifício. Verifica-se que os conjuntos mais substanciais de edifícios possuem um grau de de confiança médio de E/M, com 24 edifícios (cerca de 22%), e M+, com 23 edifícios (cerca de 21%). Nesta análise verifica-se que existe 5 edifícios com grau de confiança medio baixo. O Grau de confiança médio de B- apresenta 3 edifícios (cerca de 3%), enquanto que os graus de confiança médio de B e B+ apresentam 1 edifício cada (cerca de 1%).

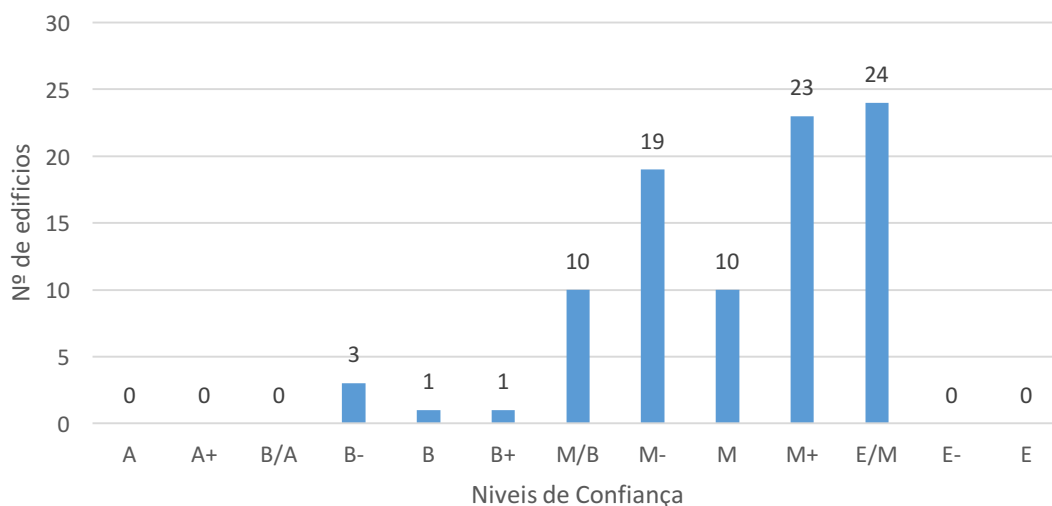


Figura 5-12 – Distribuição dos edifícios pelo grau de confiança médio associado à respetiva classificação

Numa análise do grau de confiança médio em relação aos índices de vulnerabilidade de cada edifício analisado, como se pode ver na Figura 5-13, o intervalo 2,75 até 4 apresenta um elevado número de edifícios. Visto que até a esse intervalo, o grau de confiança médio corresponde ao M-, consegue-se dizer que esses valores do  $I_v$  estão corretos. Cerca de 15 edifícios (13 % dos edifícios) apresentam um  $I_v$  com alguma discrepância visto que o grau de confiança começa a ser relativamente baixo.

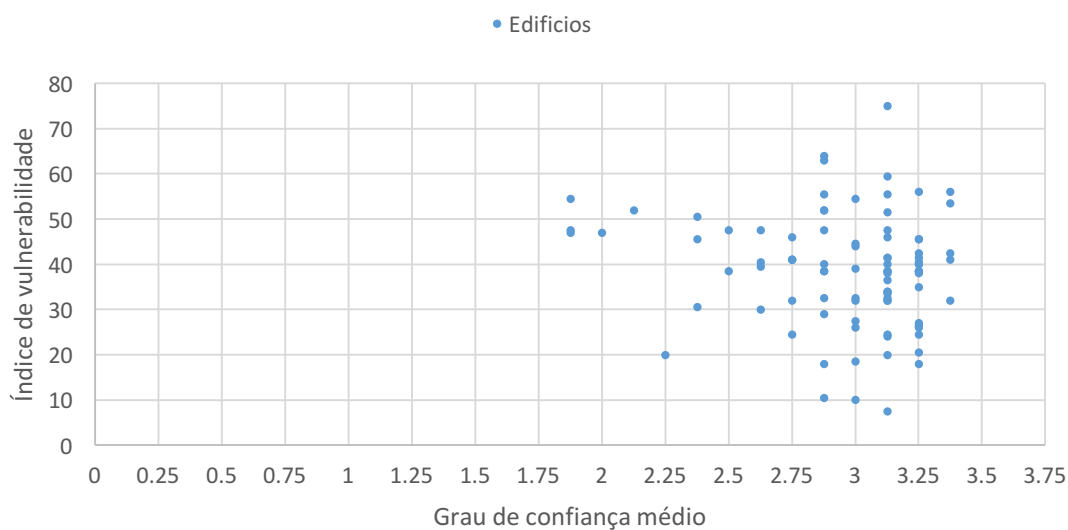


Figura 5-13 – Relação entre o grau de confiança e o índice de vulnerabilidade atribuído a cada edifício analisado

## 5.4 Estimativa de dano

### 5.4.1 Grau de dano dos edifícios analisados

Após a análise do índice de vulnerabilidade para os edifícios de betão armado, interessa estimar o grau de dano médio,  $\mu_D$ , para cada um deles. A atribuição do grau de dano a cada edifício, foi atribuído individualmente por um grupo de investigadores, assumindo depois à media desses valores. Com este procedimento, alcançou-se um grau de dano mais fiável para a obtenção da expressão de dano. Não existindo quaisquer curvas desenvolvidas e validadas para o caso dos edifícios de betão armado, que correlacionassem a severidade da ação sísmica com o dano atribuído, procedeu-se à utilização de informação e documentação dos 91 edifícios atingidos pelos sismos escolhidos em diferentes partes do mundo, mas atingidas com diferentes intensidades. Esta avaliação realizada aos 91 edifícios, permitiu, obter uma correlação entre o índice de vulnerabilidade obtido, a intensidade macrossísmica registada no local, e o dano observado. A Figura 5-14 demonstra a variação do grau de dano médio por intensidade sísmica de cada edifício. Os sismos de intensidade V e VI foram excluídos para a obtenção das curvas de vulnerabilidade por terem sido analisados um número muito reduzido de edifícios.

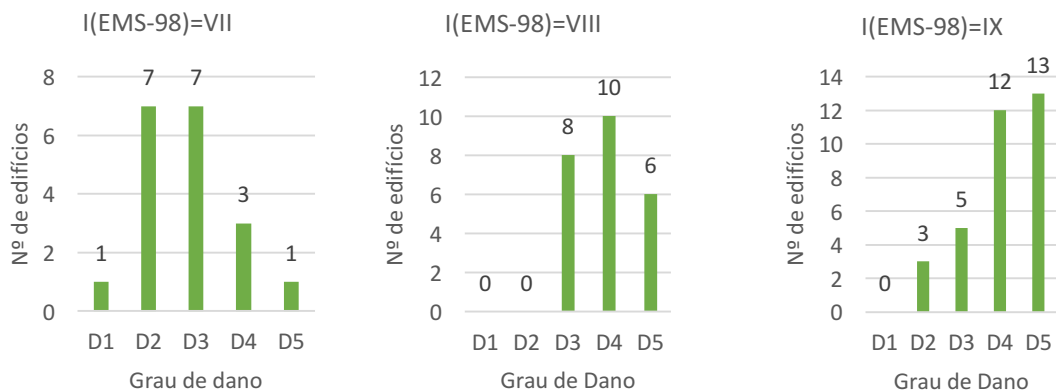


Figura 5-14 - Histograma de distribuição de dano para Intensidades VII, VIII e IX

A análise da figura permite-nos verificar que para um cenário com intensidade sísmica igual ou superior a VIII, os edifícios apresentam um elevado número de grau de dano

médio na ordem de  $D_k = 4$  e  $D_k = 5$ . Isto significa que a maioria destes edifícios, em cenário sísmico, iria apresentar danos severos ou até mesmo o colapso.

#### 5.4.2 Formulação da expressão de dano para edifícios de betão armado

A metodologia utilizada na elaboração do estudo de vulnerabilidade sísmica constitui uma versão adaptada da Escala Macrossísmica Europeia, EMS-98, por Giovinazzi e Lagomarsino (2004). Os autores elaboraram um índice de vulnerabilidade para cada tipologia construtiva com 5 valores representativos do valor da vulnerabilidade que pode assumir:  $V_I^*$ ,  $V_I^-$ ,  $V_I^+$ ,  $V_{Imin}$  e  $V_{Imax}$ . Desses valores, o  $V_I^*$  corresponde ao valor mais provável para uma tipologia específica de construção e os valores de  $V_{Imin}$  e  $V_{Imax}$  correspondem ao menor e ao maior valor de intervalo que cada tipologia construtiva pode assumir, como se pode verificar na Tabela 5-3. A cada tipologia construtiva associa-se um índice de vulnerabilidade,  $V$ , que assume valores entre 0 e 1 e descreve a mesma em termos da percentagem que representa para as várias tipologias, classificadas de A a F sendo que a tipologia A aquela que representa o pior comportamento à ação sísmica e a tipologia F o melhor comportamento sismo-resistente. O que foi referido anteriormente pode ser visto na Tabela 5-4, onde a atribuição das classes às diferentes tipologias construtivas é representado pela atribuição de cores: Cinzento escuro representa a classe mais provável, a cinzento representa a classe possível e a cinzento claro representa a classe improvável.

Tabela 5-3 - Índices de vulnerabilidade para cada tipologias de betão armado. Fonte: Giovinazzi (2005)

Tipologia construtiva		Indicador de vulnerabilidade				
		$V_{Imin}$	$V_I^-$	$V_I^*$	$V_I^+$	$V_{Imax}$
<b>Betão armado</b>	Estrutura de betão armado sem resistência sísmica (RC1)	0.3	0.49	0.644	0.8	1.02
	Estrutura de betão armado com moderada resistência sísmica (RC2)	0.14	0.33	0.484	0.64	0.806
	Estrutura de betão armado com elevada resistência sísmica (RC3)	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.7
	Paredes de betão armado sem resistência sísmica (RC4)	0.3	0.367	0.544	0.67	0.86
	Paredes de betão armado com moderada resistência sísmica (RC5)	0.14	0.21	0.384	0.51	0.7
	Paredes de betão armado com elevada resistência sísmica (RC6)	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54

Tabela 5-4 - Atribuição da classe de vulnerabilidade às diferentes tipologias construtivas. Fonte: Giovinazzi (2005)

Tipologia construtiva		Indicador de vulnerabilidade					
		A	B	C	D	E	F
<b>Betão armado</b>	Estrutura de betão armado sem resistência sísmica (RC1)						
	Estrutura de betão armado com moderada resistência sísmica (RC2)						
	Estrutura de betão armado com elevada resistência sísmica (RC3)						
	Paredes de betão armado sem resistência sísmica (RC4)						
	Paredes de betão armado com moderada resistência sísmica (RC5)						
	Paredes de betão armado com elevada resistência sísmica (RC6)						

Como se apresenta na Equação 5.1, baseada na equação proposta por Vicente (2008), a partir deste valor do índice de vulnerabilidade,  $V$ , é construída a função de vulnerabilidade, traduzida por uma expressão analítica para o edifício, ou tipologia de edifícios para diferentes intensidades macrossísmicas, EMS-98 (Grünthal, 1998), com o grau de dano médio,  $\mu_D$ , que assume valores entre 0 e 5.

$$\mu_D = a \times \left[ 1 + \tanh \left( \frac{x + b \times V - 11.6}{Q} \right) \right] \quad (5.1)$$

Este valor de grau de dano médio,  $\mu_D$ , depende das variáveis  $a$  e  $b$  que serão obtidas através de repetidas calibrações de forma a obter melhores valores da variável  $x$ , que representa a intensidade macrossísmica, da variável  $V$ , que é o índice de vulnerabilidade, e de um coeficiente  $Q$  que é referente à ductilidade de uma determinada tipologia estrutural. Com base no índice de vulnerabilidade,  $V$ , é possível calcular as probabilidades de serem alcançados ou excedidos cada um dos diversos graus de dano propostos na EMS-98 (D1 a D5) em função da intensidade. O valor de  $V$  é obtido através da Equação (5.2), onde  $d$  e  $e$  são variáveis dependentes dos valores de Giovinazzi e Lagomarsino para cada tipologia e o  $I_v$  é o índice de vulnerabilidade obtido da análise de cada edifício.

$$V = d + I_v \times e \quad (5.2)$$

Para a obtenção do valor do índice de vulnerabilidade,  $V$ , referente à metodologia macrossísmica foram formuladas três hipóteses. Numa primeira hipótese obteve-se a Equação (5.3) usando os valores do  $V_{Imin}$  e o  $V_{Imax}$  referente à tipologia RC1, da Tabela 5-3. Para a variável  $d$  utilizou-se o maior valor do  $V_{Imin}$  e para a obtenção do valor da variável  $e$ , atribui-se ao  $V$  o valor de 1.02, referente ao maior valor do  $V_{Imax}$ , e ao  $I_v$  o valor máximo de 100 obtendo assim o valor de 0.0072 para a variável  $e$ . Esta hipótese foi excluída porque não englobava todos os casos dos tipos de construção presentes na Tabela 5-3 pois no caso de o  $I_v$  ser 0 o valor de  $V$  seria 0.3.

$$V = 0.3 + I_v \times 0.0072 \quad (5.3)$$

Da segunda hipótese resultou a Equação (5.4), usando os valores médios do  $V_{Imin}$  e do  $V_{Imax}$  da Tabela 5-3. Para a variável  $d$  utilizou-se o maior médio do  $V_{Imin}$  e para a obtenção do valor da variável  $e$  atribui-se ao  $V$  o valor médio do  $V_{Imax}$  e ao  $I_v$  o valor máximo de 100 obtendo assim o valor de 0.0066 para a variável  $e$ . Esta hipótese também foi excluída porque não englobava todos os valores que do índice de vulnerabilidade,  $V_I$ , presentes na Tabela 5-3.

$$V = 0.2 + I_v \times 0.0066 \quad (5.4)$$

Finalmente, na terceira e última hipótese analisada, a Equação (5.5) resulta da utilização do valor mais baixo do  $V_{Imin}$  e do valor mais elevado do  $V_{Imax}$ , apresentados na Tabela 5-3. Para a variável  $d$  utilizou-se o menor valor do  $V_{Imin}$  e para a obtenção do valor da variável  $e$  atribui-se ao  $V$  o valor de 1.02, referente ao maior valor do  $V_{Imax}$ , e ao  $I_v$  o valor máximo de 100 obtendo assim o valor de 0.0104 para a variável  $e$ . Esta foi a hipótese escolhida pois assim consegue abranger todos os índices de vulnerabilidade,  $V$ , para todas as tipologias dos edifícios de betão armado presentes na Tabela 5-3.



$$V = -0.02 + Iv \times 0.0104 \quad (5.5)$$

Depois de conseguido chegar à expressão para a obtenção do valor de  $V$ , utilizou-se o programa informático *Matlab®* para a realização de sucessivos ajustes e calibrações. Procedeu-se à importação dos dados sobre os edifícios para a ferramenta de *curve fitting tool*. Esta ferramenta permite comparar vários modelos de aproximação para equações personalizadas, fornecendo como output os valores que, para cada uma das variáveis livres da equação, conduzem ao melhor ajuste entre a expressão analítica e as observações. Na utilização deste programa procedeu-se à escolha de certos dados para a obtenção da expressão de dano. Para a lista x utilizou-se a intensidade macrosísmica  $e$ , na lista y, utilizou-se o grau de dano médio obtido para cada um dos 91 edifícios avaliados. Utilizando como valor fixo o valor médio do índice de vulnerabilidade ( $I_{vmédio}=38.73$ ) e admitindo que a curva apresenta um desenvolvimento do tipo hiperbólico, chegou-se à expressão analítica de grau de dano médio,  $\mu_D$ , dada pela Equação 5.6, onde as variáveis  $a$  e  $b$  assumem, respetivamente, os valores de 2.839 e 10.79. Importa ainda acrescentar que foi atribuído o valor de 5.0 ao coeficiente  $Q$ , valor este estipulado em consonância com as indicações REBAP (REBAP, 1983) para os edifícios de betão armado.

$$\mu_D = 2.839 \times \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 10.79 \times V - 11.6}{5} \right) \right] \quad (5.6)$$

A Figura 5-15 apresenta a aproximação obtida para um índice de vulnerabilidade de 38.73 (o índice de vulnerabilidade médio para os 91 edifícios analisados), através de uma curva polinomial de 3º grau. Os 3 pontos representados a azul escuro foram obtidos através da média dos valores resultantes da aplicação  $I_v$  aos edifícios avaliados para as intensidades VII, VIII e IX. Como se pode verificar o desenvolvimento da curva obtida ajusta-se bem aos pontos resultantes da observação. Como se pode observar na Tabela 5-5, esta diferença é mais significativa apenas para a intensidade VIII.

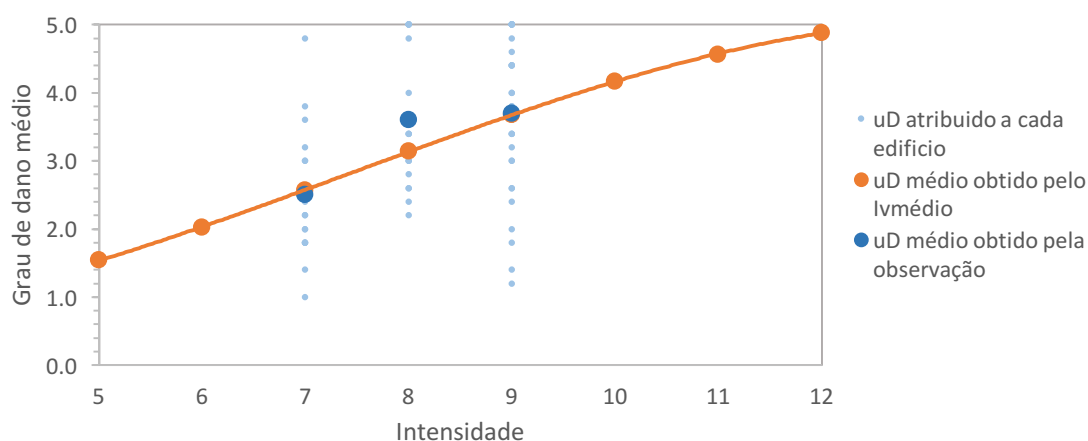


Figura 5-15 - Curva de melhor ajuste aos valores médios de dano avaliados aos edifícios

Tabela 5-5 – Diferença percentual entre o  $\mu_D$  médio observado e o  $\mu_D$  médio pela expressão

Intensidade	$\mu_D$ médio observado	$\mu_D$ médio pela expressão	Diferença %
VII	2,5	2,573	2,92%
VIII	3,6	3,138	12,81%
IX	3,7	3,681	0,49%

Na Figura 5-16 apresentam-se as curvas de vulnerabilidade, construídas com o valor médio do índice de vulnerabilidade definidos pela adição e subtração, simples ou dupla, do valor obtido para o desvio padrão de valor 12.3 da distribuição do índice de vulnerabilidade médio dos 91 edifícios avaliados. A análise das curvas de vulnerabilidade permite concluir que o intervalo de variação do grau de dano para uma determinada intensidade sísmica é considerável.

Com a análise do gráfico da Figura 5-16 é de notar que, quando um edifício apresenta um índice de vulnerabilidade elevado, superior a 51, valor alcançável se o edifício em análise apresentar problemas estruturais como *soft-storey*, pilares curtos ou certas irregularidades estruturais, para uma intensidade macrosísmica de V, este já poderá apresentar um grau de dano de valor 2 ou 3, o que levará a danos severos no edifício. Já se for sujeito a intensidades macrosísmicas VIII ou IX, este já poderá apresentar grau de dano de valor 4, ou até mesmo superior, levando o edifício a apresentar danos muitos graves na sua estrutura, ou até mesmo ao colapso do edifício. Um edifício que não apresente problemas

estruturais relevantes conduzirá a um índice de vulnerabilidade baixo, com valores inferiores a 26. Caso esse edifício seja sujeito a uma intensidade sísmica V, vai apresentar um grau de dano médio de valor 1 e, mesmo sendo sujeito a intensidades macrosísmicas de VIII ou IX, o edifício não vai apresentar graus de dano superiores a 2 e 3. Desta forma, o edifício poderá apresentar danos severos, mas não colapsa.

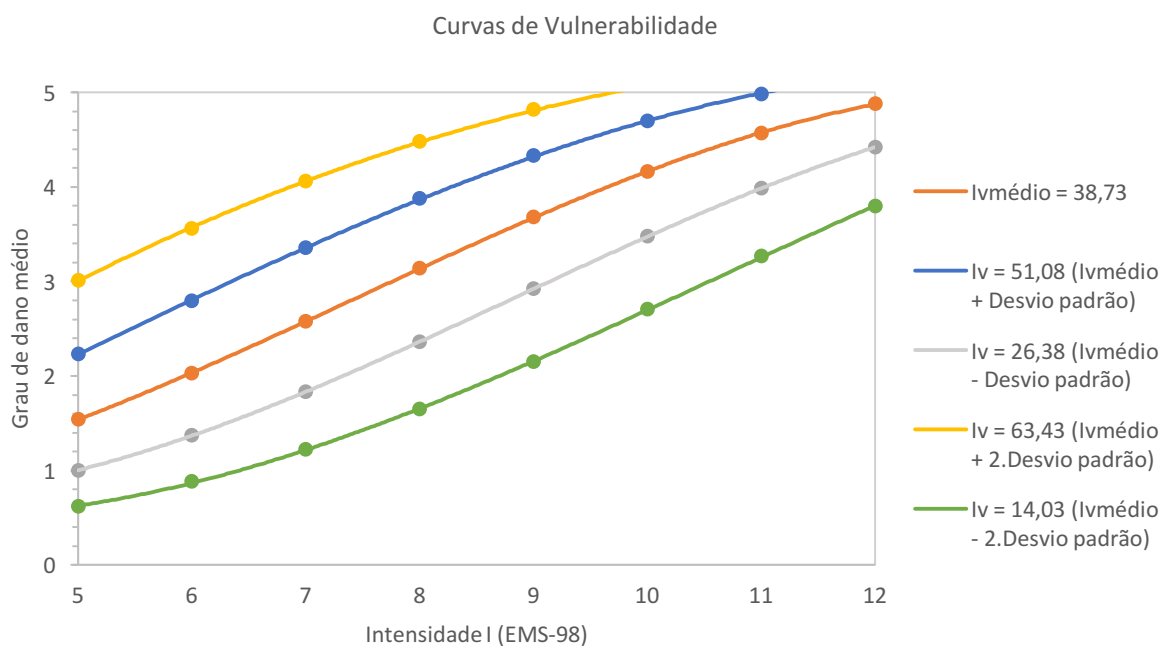


Figura 5-16 – Curvas de vulnerabilidade para os edifícios de betão armado

## 5.5 Comentários finais

Após a avaliação e análise dos resultados obtidos, é possível retirar algumas conclusões sobre todo este processo. A análise do índice de vulnerabilidade sísmica permitiu identificar os parâmetros que mais influenciam o comportamento dos edifícios quando sujeitos a um sismo, permitindo assim, uma calibração dos pesos de cada parâmetro na formulação do  $I_v$ . Em relação ao grau de confiança médio dos parâmetros, a sua análise permitiu saber quais os parâmetros que deverão ter um estudo mais detalhado, de modo a melhorar e controlar a qualidade dos resultados do índice de vulnerabilidade. O desenvolvimento e calibração de uma expressão de grau de dano médio permitiu obter o grau de dano do edifício, quando este é sujeito a uma certa intensidade. De forma geral, quando o edifício apresenta um índice de vulnerabilidade elevado, este estará mais propenso a sofrer mais danos, mesmo que sujeito a uma intensidade sísmica reduzida.

Por fim, a metodologia proposta para a avaliação da vulnerabilidade sísmica baseada na observação de danos, assume-se como uma abordagem de tipo *first level*, pois identifica 8 parâmetros fundamentais neste tipo de construção, que regem o comportamento e a resposta sísmica dos edifícios, sendo de grande interesse para a análise de regiões ou grandes áreas, numa perspetiva de mitigação, sendo que a sua maior vantagem passa por ser aplicada, mesmo com limitada utilização de recursos.

## **CAPÍTULO 6**

---

### **CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO**

#### **FUTURO**



## Capítulo 6. Conclusões e propostas de trabalho futuro

### 6.1 Principais conclusões

O objetivo principal desta dissertação consistiu numa proposta e desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios de betão armado existentes. Este trabalho foi desenvolvido em 4 fases: na primeira fase, procedeu-se à discussão e seleção dos diversos parâmetros de avaliação da vulnerabilidade, bem como à atribuição dos seus respetivos pesos e classes de vulnerabilidade. Na segunda fase, aplicou-se a metodologia a um grupo de edifícios com danos observados em sismos recentes, com objetivo de se obter o índice de vulnerabilidade de cada um. Nesse ponto, também se atribuiu a cada parâmetro analisado um grau de confiança, tendo em conta o tipo e a fiabilidade da informação adquirida. Com a análise do grau de confiança conseguiu-se saber se os índices de vulnerabilidade anteriormente obtidos estavam adequados. Já na terceira fase, uma série de observadores procedeu à atribuição do grau de dano de cada edifício, tendo sido obtendo desta forma o grau de dano médio para cada edifício. Na quarta e última fase, procedeu-se à análise dos valores obtidos e à sua introdução no programa *Matlab®*, para a obtenção da equação do grau de dano para os edifício de betão armado, bem como as respectivas curvas de vulnerabilidade.

Esta metodologia, utilizando poucos elementos e de fácil expedita e sem necessidade de entrar dentro dos edifícios, torna-se rápida e simples de aplicar na análise do rastreio do risco sísmico em larga escala. Através dela é possível desenvolver cenários de dano que permitem ter uma visão global de um risco sísmico desta tipologia.

A análise dos resultados da aplicação do índice de vulnerabilidade dos edifícios de betão armado contribuiu para identificar os parâmetros que mais influenciam o comportamento destas estruturas quando sujeitos a um sismo, permitindo assim, uma melhor calibração dos pesos de cada parâmetro na formulação do  $I_v$ . Numa análise global aos parâmetros obtidos em todos os casos de estudo, verifica-se uma maior vulnerabilidade para os edifícios mais antigos. Esta vulnerabilidade surge associada às soluções estruturais

inadequadas adotadas no projeto e construções tradicionais. Para que os resultados obtidos permaneçam fidedignos é necessário que os parâmetros escolhidos sejam recolhidos com qualidade, garantindo desta forma uma adequada capacidade de avaliação do comportamento sísmico dos edifícios. O desenvolvimento e calibração da expressão de vulnerabilidade sísmica permitiu determinar um grau de dano associado ao edifício, quando este é sujeito a uma certa intensidade sísmica. De forma simplificada, quando o edifício apresenta um índice de vulnerabilidade elevado, este estará mais propenso a sofrer mais danos, mesmo que sujeito a uma intensidade sísmica reduzida.

Embora os resultados obtidos sejam adequados, estão naturalmente afetados por eventuais erros e imprecisões associados às suposições admitidas, sendo por isso considerado que é necessária uma avaliação mais rigorosa e abrangente, de modo a tornar esta metodologia mais robusta. Será assim necessária uma revisão mais aprofundada para os parâmetros associados a problemas do solo, com intenção de compreender melhor a interação existente entre o edifício e o próprio solo de forma a avaliar o seu verdadeiro comportamento numa eventual ocorrência de um sismo. Já no parâmetro associado à idade da sua construção, aplicada ao regulamento sísmico da sua época, será também necessária uma avaliação mais detalhada a partir da consultada dos projetos, ou informação do quarteirão em que este está inserido.

Apesar disso, esta metodologia foi aplicada com sucesso aos vários edifícios estudados, fornecendo indicações acerca de quais os edifícios potencialmente mais vulneráveis e que eventualmente poderão necessitar de alguma intervenção de reforço estrutural, de modo a cumprirem os critérios de segurança impostos pelas atuais normas sísmicas. Por fim, esta metodologia pode ser considerada como uma ferramenta base a ser aplicada numa primeira análise, *first level*, de um processo de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios de betão armado sendo que, a sua maior vantagem, passa por ser aplicada mesmo com limitada utilização de recursos.



## **6.2 Perspectivas de trabalho futuro**

Ao longo desta dissertação, foram identificadas diversas linhas de desenvolvimento futuro. Indicam-se de seguida, alguns trabalhos de interesse desenvolver:

- Aplicação da metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios de betão armado a outros casos de estudo, de preferência a uma localidade onde for feito o estudo, de forma a poder deslocar-se ao local para a recolha de informação, contribuindo assim para melhorar a avaliação dos parâmetros analisados e obter uma avaliação da vulnerabilidade sísmica mais rigorosa. Essa informação recolhida pode ser integrada numa plataforma SIG e construir cenários de dano e de perda;
- Elaboração de um segundo nível de avaliação, sendo esta uma análise mais detalhada do edifício quando este apresenta valores de índice de vulnerabilidade elevados;
- A partir da equação de dano obtida nesta dissertação, realizar o estudo para vários coeficientes de ductilidade;
- Aumentar a base de dados aqui fornecida nesta dissertação para sismos de intensidade V e VI, e aferir a sua influência na curva de grau de dano médio.



## **BIBLIOGRAFIA**

---



## Bibliografia

- ATC-21. (2002).** *Rapid Visual Screening of buildings for potential seismic hazards: a handbook (FEMA154)*. Redwood City: Applied Technology Council, FEMA 154, Edition 2.
- Azevedo, J. (2008).** Caracterização da acção sísmica. Em Lopes, M. - Sismos e edifícios. Amadora: Edições Orion. pp. 141–187.
- Bal, I. E., Tezcan, S., & Gulay, G. (2006).** Advanced applications of the p25 scoring method for the rapid assessment of rc buildings. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, September 3-8, Geneva, Switzerland. Paper No: 67.
- Bertero, V. V. (1982).** State of the art in seismic resistant construction of structures. In *The Third International Earthquake Microzonation Conference*, June 28-July 1, Seattle, U.S.A., pp. 767–805.
- Bhatt, C. A. F. (2007).** *Análise Sísmica de Edifícios de Betão Armado segundo o Eurocódigo 8 – Análises Lineares e Não Lineares*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Carvalho, E. (2004).** *Prevenção e Protecção das Construções Contra Riscos Sísmicos – Eurocódigos Estruturais*. Lisboa: Edições Fundação Luso-Americana. Retrieved from <http://www.flad.pt/wp-content/uploads/2014/05/livro27.pdf>
- CEN. (2004).** *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance—Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1: 2004)*. European Committee for Normalization, Brussels (Vol. 1).
- Coelho, F. M. (2010).** *Análise e Dimensionamento á Acção Sísmica - Aplicada a um caso prático*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Cole, G. L., Dhakal, R. P., Carr, a J., & Bull, D. K. (2010).** Building pounding state of the art: Identifying structures vulnerable to pounding damage. *2010 NZSEE Conference*, (11), 1–9.
- D'Ayala, D., & Speranza, E. (2002).** *An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings*. disp, 3(1), 3-3. *12th European Conference on Earthquake Engineering*, London, UK. University of Bath, UK.
- D'Ayala, D., & Speranza, E. (2003).** Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings. *Earthquake Spectra*, 19(3), 479–509. <http://doi.org/10.1193/1.1599896>

- Fernandes, C., Varum, H., & Costa, A. (2007).** Concrete-steel bond characterization of RC structural elements built with smooth plain reinforcement bars. *2nd Symposium "Connections between Steel and Concrete,"* 1–10, 4 - 7 de Setembro de 2007. Universidade de Estugarda, Estugarda, Alemanha.
- Ferreira, C. (2008).** *Vulnerabilidade sísmica do parque edificado na cidade de Aveiro.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Ferreira, T. (2009).** *Avaliação da vulnerabilidade sísmica das paredes de fachada de edifícios em alvenaria.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Ferreira, T. (2010).** *Avaliação da vulnerabilidade sísmica de núcleos urbanos antigos. Aplicação ao núcleo urbano antigo do Seixal.* Dissertação de Estudos Avançados em Reabilitação de Património Edificado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- Ferreira, T. (2015).** *Out-of-plane Seismic Performance of Stone Masonry Walls: Experimental and Analytical Assessment.* Universidade de Aveiro. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Giovinazzi, S. (2005).** *the Vulnerability Assessment and the Damage Scenario in Seismic Risk Analysis.* Ph.D Thesis of the doctoral course "Risk Management on the built environment" jointly organized by University of Florence (I) and TU-Braunschweig (D).
- Giovinazzi, S., & Lagomarsino, S. (2004).** A Macroseismic Model for the Vulnerability Assessment of Buildings. *13th World Conference on Earthquake Engineering.* Vancouver, Canada, paper 896.
- GNDT-SSN. (1994).** Scheda di esposizione e vulnerabilità e di rilevamento danni di primo e secondo livello (murata e cemento armato). *Gruppo Nazionale per La Difesa Dai Terremoti, Roma.* Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma.
- Grünthal, G. (1998).** European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98), European Seismological Commission, Subcommission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic Scales. *European Seismological Commission, Subcommission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic Scales, Conseil de l'Europe, 15,* 101.
- Haddow, G. D., Bullock, J. a., & Coppola, D. P. (2002).** An Introduction to Emergency Management. *Public Administration Review,* 62(5), 632–633. <http://doi.org/10.1111/1540-6210.00244>
- Hirosawa, M., Sugano, S., & Kaminosono, T. (1993).** Seismic evaluation method and

- restoration techniques for existing and damaged buildings developed in Japan. In *Retrofitting and restration of buildings in Japan* (pp. 1-69). International Institute of Seismology and Earthquake Engineering; Building Research Institute; Ministry of Construction.
- Lang, K. (2002).** *Seismic vulnerability of existing buildings*. Hochschulverlag AG. Institute of Structural Engineering Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. Retrieved from <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:25201/eth-25201-01.pdf>
- Lopes, M. (2008).** *Concepção de Estruturas. Sismos e Edifícios. (1ª edição)*, Lisboa, Edições Orion.
- Marques, D. F. F. (2012).** *Comportamento Sísmico de Edifícios Antigos de Betão Armado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Medvedev, S. V., & Sponheuer, W. (1969).** MSK Scale of seismic intensity. In *Proc. IV World Conference of the Earthquake Engineering, Santiago, Chile, A-2* (pp. 143-153).
- Moehle, J. P., & Mahin, S. A. (1991).** *Observations on the behavior of reinforced concrete buildings during earthquakes*. ACI Special Publication. ACI publication SP-127. <http://doi.org/10.14359/3007>
- C. S. Oliveira, A. Roca, e X. Goula (2006).** *Assessing and managing earthquake risk. An introduction*, 2nd Editon. Springer Netherlands. ISBN: 978-1-4020-3524-1. Retrieved from <http://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-3608-8>
- OPS. (1993).** Mitigation of disasters in health facilities: volume 4 - engineering issues. *Evaluation and Reduction of Physical and Functional Vulnerability*. Retrieved from [http://cidbimena.desastres.hn/docum/ops/Mitigasalud/Mitigacion/Contenidos/english/fr\\_mitig\\_en.htm](http://cidbimena.desastres.hn/docum/ops/Mitigasalud/Mitigacion/Contenidos/english/fr_mitig_en.htm)
- Paulay, T., & Priestley, N. (1992).** *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. John Wiley & Sons, Inc.
- Pinto, A. V. (1998).** Introduction to the European research projects in support of Eurocode 8. In *Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France, Rotterdam AA Balkema*.
- Quarantelli, E. L. (1988).** Disaster Studies: An Analysis of the Social Historical Factors Affecting the Development of Research in the Area. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 5(3), 285–310. Retrieved from [http://geography.ssc.uwo.ca/faculty/baxter/readings/Cutter\\_Chapter2\\_Quarantelli\\_Disasters.pdf](http://geography.ssc.uwo.ca/faculty/baxter/readings/Cutter_Chapter2_Quarantelli_Disasters.pdf)
- Quarantelli, E. L. (1997).** Research based criteria for evaluating disaster planning and

- managing. *Disasters*, 21(1), 39–56. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9086633>
- Rai, D. C. (2008).** A generalized method for seismic evaluation of existing buildings. *Current science*, 94(3), 363-370.
- REBAP. (1983).** *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado*. (L. Imprensa Nacional - Casa da Moeda, Ed.). Lisboa: Decreto-Lei n.º349-C/83.
- Rodrigues, H. (2005).** *Desenvolvimento e Calibração de Modelos Numéricos para a Análise Sísmica de Edifícios*. Dissertação de mestrado. Estruturas de Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto, Portugal. Retrieved from <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/12248>
- Rodrigues, L. (2009).** *Metodologias Simplificadas de Avaliação Sísmica de Edifícios de BA*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Romãozinho, M. (2008).** *Dimensionamento para a Acção do EC8, Análise das Prescrições da EN 1998-1 Aplicadas a Estruturas de Edifícios de Betão Armado com Recurso a um Exemplo prático*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal. Retrieved from <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137606890/Dissertacao.pdf>
- Sandi, H., & Floricel, I. (1994).** Analysis of seismic risk affecting the existing IX building stock. In *In Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 2, pp. 1105–1110). Retrieved from [http://scholar.google.pt/scholar?hl=en&as\\_sdt=0,5&q=analysis+of+seismic+risk+affecting+the+existing+building+stock.#0](http://scholar.google.pt/scholar?hl=en&as_sdt=0,5&q=analysis+of+seismic+risk+affecting+the+existing+building+stock.#0)
- Santos, R. R. dos. (2011).** *Modelação de paredes resistentes em edifícios de betão armado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal. Retrieved from <http://run.unl.pt/handle/10362/5180>
- Stahlin, W. (1997).** Seismic design and performance of nonstructural components in hospitals. In ATC-29-1 (Ed.), *Proceedings of Seminar on Seismic Design, Retrofit, and Performance of Nonstructural Components*. (pp. 469–473).
- Sucuoglu, H., & Yazgan, U. (1999).** Simple Survey Procedures for Seismic Risk Assessment In Urban Building Stocks. *Seismic Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, NATO Science Series IV.*, 79–118.
- Tezcan, S. S., Bal, I. E., & Gulay, F. G. (2009).** Risk Management and a Rapid Scoring Techniqu for Collapse Vulnerability of RC Buildings. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 10, 71–89. [http://doi.org/10.1007/978-90-481-2681-1\\_4](http://doi.org/10.1007/978-90-481-2681-1_4)



- Varum, H., Costa, A., & Pinto, A. V. (2005).** Reforço Sísmico do Património Edificado em Betão. *2º Seminário - A Intervenção No Património. Práticas de Conservação E Reabilitação*, 1–22. Porto, Portugal.
- Varum, H., Rodrigues, H., Vicente, R., & Costa, A. (2011).** A influência das paredes de enchimento na resposta sísmica de estruturas de edifícios. *Paredes Divisórias: Passado, Presente e Futuro*, 111–128. Braga, Portugal.
- Vicente, R. (2008).** *Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra.* Universidade de Aveiro. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Vicente, R., Ferreira, T. M., Maio, R., Costa, A. A., Estêvão, J., Varum, H., Oliveira, C. S. (2014).** Metodologia de avaliação da vulnerabilidade sísmica: calibração e validação macrosísmica. *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, 9º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica*. <http://doi.org/10.13140/2.1.1514.7207>
- Vicente, R., Parodi, S., Lagomarsino, S., Varum, H., & Silva, J. a. R. M. (2011).** Seismic vulnerability and risk assessment: case study of the historic city centre of Coimbra, Portugal. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(4), 1067–1096. <http://doi.org/10.1007/s10518-010-9233-3>
- Yakut, A., Erberik, A., Akkar, S., & Sucuoglu, H. (2012).** Rapid Seismic Assessment Procedures for Turkish Building. In *Seismic Evaluation and Rehabilitation of Structures* (pp. 15–35). Springer International Publishing.
- Yepez, F., Barbat Barbat, H. A., & Canas Torres, J. A. (1995).** *Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería.* Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).



## **ANEXO I**

---

### **FICHAS DE INSPEÇÃO**





3. REGISTO FOTOGRÁFICO	
FICHAS DE INSPEÇÃO	Folha nº
	2

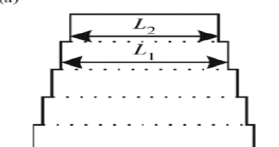
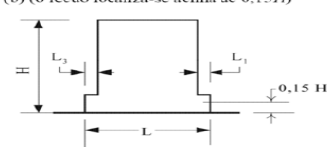
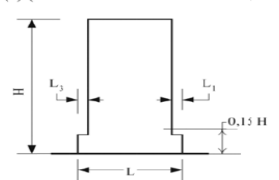
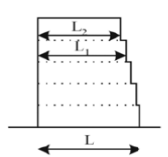
<b>PARÂMETRO P1 - IMPLANTAÇÃO DO EDIFÍCIO</b>			
<p>1.1 - Localização</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 60%;">Construção em terreno plano</div> <div style="width: 35%; border: 1px solid black; height: 20px;"></div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 60%;">Construção em aterro</div> <div style="width: 35%; border: 1px solid black; height: 20px;"></div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 60%;">Construção em terreno inclinado</div> <div style="width: 35%; border: 1px solid black; height: 20px;"></div> </div> <p>1.2 - Tipo de solo</p> <div style="display: flex; margin-top: 10px;"> <div style="width: 30%;">           Solo A            Solo B            Solo C            Solo D            Solo E         </div> <div style="width: 65%; border: 1px solid black; height: 40px; position: relative;"> <div style="position: absolute; top: 0; left: 0; right: 0; height: 15px;"></div> <div style="position: absolute; top: 15px; left: 0; right: 0; height: 15px;"></div> <div style="position: absolute; top: 30px; left: 0; right: 0; height: 15px;"></div> <div style="position: absolute; top: 45px; left: 0; right: 0; height: 15px;"></div> <div style="position: absolute; top: 60px; left: 0; right: 0; height: 15px;"></div> </div> </div>			
<p>Notas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Solo tipo A – Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 metros de material mais fraco à superfície.</li> <li>Solo tipo B – Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rijas, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade.</li> <li>Solo tipo C – Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixo (cascalho) ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros.</li> <li>Solo tipo D - Depósitos de solo não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura.</li> <li>Solo tipo E – Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial.</li> </ul>			
Grau de confiança (EMBA):	E (Elevado) M (Médio) B (Baixo) A (Ausente)	<div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div> <div style="border: 1px solid black; height: 20px; width: 100%;"></div>	
<b>FICHAS DE INSPEÇÃO</b>			Folha nº <div style="text-align: center; border-top: 1px solid black;">3</div>

<b>PARÂMETRO P2 - CONTEXTO URBANO</b>												
<p>2.1 - Posição do edifício</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 20px;"> <div style="width: 60%;"> <p>Banda do meio (BM)</p> <p>Banda extremo (BE)</p> <p>Gaveto (G)</p> <p>Isolado (I)</p> </div> <div style="width: 35%;"> <input style="width: 100%; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/> </div> </div>												
<p>2.2 - Interação com outros edifícios</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 20px;"> <div style="width: 60%;"> <p>Interação com apenas um edifício pequeno (Só aplicado para o caso BM)</p> <p>Interação com 2 edifícios pequenos (só aplicado para o caso BM)</p> </div> <div style="width: 35%;"> <input style="width: 100%; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/> </div> </div>												
<p>2.3 - Desníveis do pavimento superior a 0.5 metros com o edifício adjacente</p> <div style="text-align: right; margin-top: 20px;"> <input style="width: 100%; height: 20px; border: 1px solid black;" type="text"/> </div>												
<p>Notas:</p>		<div style="text-align: center; margin-bottom: 20px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">I</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 30%; text-align: right; padding-right: 10px;">Posição do edifício:</div> <div style="border-collapse: collapse;"> <table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="padding: 5px;">BE</td> <td style="padding: 5px;">E</td> <td style="width: 20px;"></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="padding: 5px;">G</td> <td style="padding: 5px;">BM</td> </tr> </table> </div> </div>			BE	E			G	BM		
BE	E											
	G	BM										
<p>Desníveis do pavimento com o edifício adjacente:</p>												
<p>Grau de confiança (EMBA):</p>		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; padding: 5px;">E (Elevado)</td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"><input style="width: 100%;" type="text"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">M (Médio)</td> <td style="padding: 5px;"><input style="width: 100%;" type="text"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">B (Baixo)</td> <td style="padding: 5px;"><input style="width: 100%;" type="text"/></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">A (Ausente)</td> <td style="padding: 5px;"><input style="width: 100%;" type="text"/></td> </tr> </table>			E (Elevado)	<input style="width: 100%;" type="text"/>	M (Médio)	<input style="width: 100%;" type="text"/>	B (Baixo)	<input style="width: 100%;" type="text"/>	A (Ausente)	<input style="width: 100%;" type="text"/>
E (Elevado)	<input style="width: 100%;" type="text"/>											
M (Médio)	<input style="width: 100%;" type="text"/>											
B (Baixo)	<input style="width: 100%;" type="text"/>											
A (Ausente)	<input style="width: 100%;" type="text"/>											
<b>FICHAS DE INSPEÇÃO</b>				<p>Folha nº</p> <p>4</p>								



<b>PARÂMETRO P3 - IDADE DO EDIFÍCIO</b>									
<p>3.1 - Consideração da ação sísmica no projeto</p> <table style="width: 100%; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="width: 60%;">Construído depois de 1998</td> <td style="width: 40%; text-align: center;"><input style="width: 90%;" type="text"/></td> </tr> <tr> <td>Construído entre 1983 e 1998</td> <td style="text-align: center;"><input style="width: 90%;" type="text"/></td> </tr> <tr> <td>Construído entre 1961 e 1983</td> <td style="text-align: center;"><input style="width: 90%;" type="text"/></td> </tr> </table>				Construído depois de 1998	<input style="width: 90%;" type="text"/>	Construído entre 1983 e 1998	<input style="width: 90%;" type="text"/>	Construído entre 1961 e 1983	<input style="width: 90%;" type="text"/>
Construído depois de 1998	<input style="width: 90%;" type="text"/>								
Construído entre 1983 e 1998	<input style="width: 90%;" type="text"/>								
Construído entre 1961 e 1983	<input style="width: 90%;" type="text"/>								
<p>3.2 - Qualidade da construção:</p> <table style="width: 100%; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="width: 60%;">Boa</td> <td style="width: 40%; text-align: center;"><input style="width: 90%;" type="text"/></td> </tr> <tr> <td>Moderada</td> <td style="text-align: center;"><input style="width: 90%;" type="text"/></td> </tr> <tr> <td>Fraca</td> <td style="text-align: center;"><input style="width: 90%;" type="text"/></td> </tr> </table>				Boa	<input style="width: 90%;" type="text"/>	Moderada	<input style="width: 90%;" type="text"/>	Fraca	<input style="width: 90%;" type="text"/>
Boa	<input style="width: 90%;" type="text"/>								
Moderada	<input style="width: 90%;" type="text"/>								
Fraca	<input style="width: 90%;" type="text"/>								
<p>3.3 - Parcialmente Devoluto <span style="float: right; text-align: center;"><input style="width: 100%;" type="text"/></span></p>									
<p>Notas:</p> <p>Qualidade da construção do edifício:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Alinhamentos de armadura, espaçamento bem orientado das cintas ou estribos e comprimentos de amarração de armadura longitudinais;</li> <li>Garantir uma boa qualidade de betão e cuidado na aplicação em obra, garantindo assim uma boa capacidade de resistência, bem como a aderência necessária às armaduras;</li> <li>Boa cintagem, sobretudo nas extremidades das vigas e de pilares, e correta amarração de todos os elementos estruturais entre si;</li> <li>Garantir uma boa de execução das paredes de alvenaria.</li> </ul>									
<p>Grau de confiança (EMBA):</p>	<p>E (Elevado)</p> <p>M (Médio)</p> <p>B (Baixo)</p> <p>A (Ausente)</p>	<input style="width: 100%;" type="text"/> <input style="width: 100%;" type="text"/> <input style="width: 100%;" type="text"/> <input style="width: 100%;" type="text"/>							
<b>FICHAS DE INSPEÇÃO</b>			<p>Folha nº</p> <p style="text-align: center;">5</p>						

<b>PARÂMETRO P4 - IRREGULARIDADE EM PLANTA</b>			
4.1 - Localização excêntrica da caixa de elevador			<input style="width: 100%;" type="text"/>
4.2 - A maior dimensão do edifício em plantar é inferior a 4 vezes à menor dimensão do edifício em planta (ver notas)			<input style="width: 100%;" type="text"/>
4.3 - Edifício apresenta uma configuração em planta compacta			<input style="width: 100%;" type="text"/>
<p>Notas:</p> <p><math>\lambda = L_{\max}/L_{\min} \leq 4</math></p> <p>Com:</p> <p><math>L_{\max}</math> – Maior dimensão em planta do edifício;</p> <p><math>L_{\min}</math> – Menor dimensão em planta do edifício;</p> <p>(medidas nas direções ortogonais)</p> <p>Para garantir uma forma compacta em planta, isto é, cada piso deve ser delimitado por uma linha poligonal convexa (no que respeita à forma estrutural em planta definida pelos vários elementos verticais não contando, portanto, por exemplo, com varandas em consola, caso estas existam), sendo que, caso existam reentrâncias ou bordos recuados, estas não deverão afetar a rigidez do piso em planta e a área entre a linha exterior do piso e a linha poligonal convexa não deverá exceder em 5% da área do piso</p>			
Grau de confiança (EMBA):	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div>E (Elevado)</div> <div>M (Médio)</div> <div>B (Baixo)</div> <div>A (Ausente)</div> </div>	<div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> </div>	
<b>FICHAS DE INSPEÇÃO</b>			Folha nº
			6

<b>PARÂMETRO P5 - IRREGULARIDADE EM ALTURA</b>			
<p>5.1 - Presença de recuos</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start; margin-top: 20px;"> <div style="width: 60%;"> <p>Tipo A</p> <p>Tipo B</p> <p>Tipo C</p> <p>Tipo D</p> </div> <div style="width: 35%;"> <input style="width: 80%; height: 20px; margin-bottom: 10px;" type="text"/> <input style="width: 80%; height: 20px; margin-bottom: 10px;" type="text"/> <input style="width: 80%; height: 20px; margin-bottom: 10px;" type="text"/> <input style="width: 80%; height: 20px; margin-bottom: 10px;" type="text"/> </div> </div>			
<p>5.2 - Descontinuidade do caminho de carga</p> <div style="display: flex; justify-content: flex-end; margin-top: 10px;"> <input style="width: 80%; height: 20px;" type="text"/> </div>			
<p>5.3 - Altura diferente entre pisos</p> <div style="display: flex; justify-content: flex-end; margin-top: 10px;"> <input style="width: 80%; height: 20px;" type="text"/> </div>			
<p>Notas:</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>(a)</p>  <p>Critério para (a): <math>\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0,20</math></p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(b) (o recuo localiza-se acima de 0,15 H)</p>  <p>Critério para (b): <math>\frac{L_2 + L_3}{L} \leq 0,20</math></p> </div> </div>		
<p>Recuo Tipo A e B:</p>	<div style="text-align: center;"> <p>(c) (o recuo localiza-se abaixo de 0,15 H)</p>  <p>Critério para (c): <math>\frac{L_2 + L_3}{L} \leq 0,50</math></p> </div>		
<p>Recuo tipo C:</p>	<div style="text-align: center;"> <p>(d)</p>  <p>Critério para (d): <math>\frac{L - L_2}{L} \leq 0,30</math></p> <p><math>\frac{L_1 - L_2}{L_1} \leq 0,10</math></p> </div>		
<p>Grau de confiança (EMBA):</p>		<p>E (Elevado)</p> <p>M (Médio)</p> <p>B (Baixo)</p> <p>A (Ausente)</p>	<input style="width: 100%; height: 20px; margin-bottom: 5px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px; margin-bottom: 5px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px; margin-bottom: 5px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>
<b>FICHAS DE INSPEÇÃO</b>			<p>Folha nº</p> <p style="text-align: center;">7</p>

**PARÂMETRO P6 - EXISTÊNCIA DE MECANISMO *SOFT-STOREY***

6.1 - Edifício com possível formação de mecanismo *soft-storey*

Notas:

Formação de  
mecanismo *soft-storey*





Grau de confiança (EMBA):

E (Elevado)  
M (Médio)  
B (Baixo)  
A (Ausente)


**FICHAS DE INSPEÇÃO**

Folha nº

8

PARÂMETRO P7 - PRESENÇA DE PILARES CURTOS			
7.1 - Sem mecanismo do tipo pilar curto	<input type="text"/>		
7.2 - Possível mecanismo tipo pilar curto no piso superior	<input type="text"/>		
7.2.1 - Mais que um piso superior com presença de pilares curtos	<input type="text"/>		
7.3 - Possível mecanismo tipo pilar curto na base do edifício	<input type="text"/>		
7.3.1 - nº de pilares curtos suficientes para criar um mecanismo de piso	<input type="text"/>		
<p>Notas:</p> <p>Mecanismo de piso criado pelos pilares curtos presentes na base do edifício</p>	 		
Grau de confiança (EMBA):	E (Elevado) M (Médio) B (Baixo) A (Ausente)	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	
FICHAS DE INSPEÇÃO			Folha nº
			9

<b>PARÂMETRO P8 - OUTROS ELEMENTOS</b>			
<p>8.1 - Presença de platibandas</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 45%;">Na cobertura</div> <div style="width: 50%; text-align: center;"><input style="width: 100%;" type="text"/></div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 10px;"> <div style="width: 45%;">Nas varandas</div> <div style="width: 50%; text-align: center;"><input style="width: 100%;" type="text"/></div> </div> <p>8.2 - Avançados <span style="float: right; text-align: center;"><input style="width: 100%;" type="text"/></span></p>			
<p>Notas:</p> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">Tipos de Avançados</div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;">   </div>			
<p>Grau de confiança (EMBA):</p>	<p>E (Elevado)</p> <p>M (Médio)</p> <p>B (Baixo)</p> <p>A (Ausente)</p>	<input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 15px;" type="text"/>	
<b>FICHAS DE INSPEÇÃO</b>			<p>Folha nº</p> <p style="text-align: center;">10</p>

Avaliação do edifício			
	<b>Classe</b>	<b>Grau de confiança</b>	<b>Observações</b>
<b>Parâmetro P1</b>			
<b>Parâmetro P2</b>			
<b>Parâmetro P3</b>			
<b>Parâmetro P4</b>			
<b>Parâmetro P5</b>			
<b>Parâmetro P6</b>			
<b>Parâmetro P7</b>			
<b>Parâmetro P8</b>			
I <sub>v</sub> Final			
I <sub>v</sub> Normalizado			
Notas:			
<b>FICHAS DE INSPEÇÃO</b>			Folha nº
			11





## **ANEXO II**

---

# **CLASSIFICAÇÃO E ÍNDICES DE VULNERABILIDADE DOS EDIFÍCIOS AVALIADOS**



Edifícios		Intensidade	Iv	Grau de dano	Grau de confiança EMBA
Localidade	Código				
L'Aquila	Pag04	8	24	3,0	M+
	pet07	7	24,5	3,0	M-
	pet01-02	7	10,5	2,6	M-
	pet04-05-06	7	64	4,8	M-
	pet03	7	7,5	2,2	M+
	l'aquila comercio	8	33,5	2,6	M+
	san gregorio	9	39	4,8	M
Bolonha	Emilia_ed1	7	39,5	1,0	M/B
	Emilia_ed2	7	63	1,8	M-
	cavezzo_ed1	8	41	5,0	E/M
	cavezzo_ed2	8	34	2,2	M+
	cavezzo_ed3	8	47,5	4,0	M-
	cavezzo_ed4	8	47	5,0	B
	cavezzo_ed5	8	38,5	3,2	M+
	modena_ed1	7	38,5	2,0	E/M
	modena_ed2	7	75	2,0	M+
	modena_ed3	7	42,5	1,4	E/M
	modena_ed4	7	32,5	1,8	M-
	modena_ed5	7	32	2,2	M+
	san_possidono_ed1	6	20	1,0	M/B
	san_possidono_ed2	6	10	2,0	M
Lorca	bairro de la vina ed1	7	29	2,6	M-
	bairro de la vina ed2	7	38,5	2,4	M/B
	lorca ed1	7	54,5	1,8	M
	lorca ed2	7	40	1,8	M-
Fukushima	photo1	6	59,5	4,0	M+
	photo2	5	26	2,8	M
	photo3	6	20	3,2	M+
	photo5	5	32,5	3,4	M
	photo6	5	20,5	3,6	E/M
	photo8	5	18	3,4	E/M
	photo10	5	26	3,2	E/M
	photo14	5	24,5	2,6	E/M
	photo19	5	26,5	3,4	E/M
Turquia	photo1	9	47,5	5,0	B-
	photo2	9	40,5	5,0	M/B
	photo3	9	47,5	4,4	M/B
	photo4	9	50,5	4,4	M/B
	photo5	9	52	5,0	M-
	photo6	8	38,5	5,0	M-
	photo7	8	53,5	5,0	E/M
	photo8	8	44	5,0	M
	photo9	8	41	3,4	M-

	photo10	8	45,5	3,2	E/M
	photo11	8	36,5	2,8	M+
	photo12	9	45,5	5,0	E/M
	photo13	9	47	5,0	B-
Nova Zelândia	NZ 1	9	41,5	3,6	M+
	NZ 2	9	32	3,6	M+
	NZ 3	9	46	3,6	M+
	NZ 4	9	38,5	2,6	E/M
	NZ 5	9	32	2,6	M
	NZ 6	9	35	3,8	E/M
	NZ 7	9	41	4,6	M-
	NZ 8	9	30,5	1,4	M/B
	grand chancellor	8	45,5	3,6	M/B
	7-story vshape	8	34	3,4	M+
	11-story bluiding	8	46	3,2	M-
India	hinalchuli hotel	6	52	3,4	M-
Indonésia	elementary school	7	32,5	3,2	M+
	8-story building	7	56	3,6	E/M
	precast apartment	5	30	3,0	M/B
México	nuevo leon	8	52	4,8	B+
peru	school	7	40,5	3,0	E/M
	university	7	55,5	3,8	M+
Turquia	erzincan	8	40	2,4	E/M
	Bingol (dual system school)	8	27	2,6	E/M
	5-story	9	47,5	3,6	M+
USA	cal state	9	38,5	3,0	M+
	Barrington hospital	8	32	3,2	E/M
	Champagne	8	24,5	3,0	M+
Haiti	2-story classroom	8	55,5	3,4	M-
	teleco	8	38,5	3,2	E/M
	school cafeteria	8	38	3,0	M+
China	Sichuan_photo1	9	32	3,6	M-
	Sichuan_photo2	9	47,5	5,0	M/B
	Sichuan_photo3	9	18,5	3,2	M
	Sichuan_photo4	9	54,5	5,0	B-
	Sichuan_photo5	9	41	4,4	M-
	Sichuan_photo6	9	38,5	3,0	M-
	Sichuan_photo7	9	40	4,0	E/M
	Sichuan_photo8	9	27,5	3,4	M
	Sichuan_photo9	9	18	2,0	M-
	Sichuan_photo10	9	41,5	3,4	M+
	Sichuan_photo11	9	38	3,8	E/M
	Sichuan_photo12	9	40	1,8	M+
	Sichuan_photo13	9	41,5	3,4	E/M
	Sichuan_photo14	9	51,5	4,4	M+

	Sichuan_photo15	9	42,5	1,2	E/M
	Sichuan_photo16	9	56	2,4	E/M
	Sichuan_photo17	9	44,5	4,0	M